

Создание модели для расчёта распределения ультрафиолетового излучения в пространстве вокруг напольных облучателей

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

Аннотация

Представлен метод расчёта распределения потока УФ-излучения от системы газоразрядных ламп низкого давления с учётом их конечной геометрии. Впервые было учтено поглощение излучения непосредственно работающими УФ-лампами. Была написана компьютерная программа для расчёта распределения интенсивности светового потока в пространстве вокруг облучателя. В результате был получен достоверный метод расчёта распределения интенсивности для облучателей с вертикально расположенными источниками света и силовыми элементами конструкции. Было показано, что коэффициент 0.4 в руководстве Р 3.5.1904-04 не является оптимальным и может быть увеличен за счёт изменения конструкции облучателя, что, в свою очередь, повысит эффективность использования УФ-излучения и сократит время обработки помещений.

Ключевые слова: ультрафиолет, напольные облучатели, коэффициент использования бактерицидного потока, газоразрядные лампы, затенение, компьютерное моделирование.

Введение

Одно из главных применений ультрафиолетового излучения в наше время - обеззараживание помещений, в том числе различных поверхностей, в общественных местах с целью предотвращения распространения заболеваний [1], [2]. Действие ультрафиолета на микроорганизмы заключается в том, чтобы нанести им повреждения, несовместимые с дальнейшей жизнедеятельностью и образованием колоний, что называется инаktivацией. Для гарантированной инаktivации микроорганизмов на какой-либо поверхности, необходимо чтобы эта поверхность за время обработки набрала заранее определённую дозу ультрафиолетового излучения. Полученная доза пропорциональна времени обработки и облучённости, создаваемой на поверхности оборудованием для УФ-обработки. Вследствие наличия конструктивных особенностей облучателя, излучение, генерируемое УФ-источниками облучателя распределяется по поверхностям неравномерно: например, при наблюдении облучателя под определёнными углами вертикальные силовые элементы могут частично или полностью перекрывать часть ламп, иначе говоря, происходит затенение. 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. Такое решение не является оптимальным, так как фактически этот коэффициент (коэффициент использования бактерицидного потока) может быть, как больше, так и меньше 0.4, в зависимости от конструкции конкретного устройства. Эффект затенения ламп приводит к тому, что даже поверхности, расположенные рядом, наберут различную дозу за время экспозиции, что в случае недобора дозы приведёт к недостаточной степени обеззараживания. Иными словами, существующая проблема неравномерного распределения потока УФ-излучения от облучателей решена тривиально, но не оптимально. На сегодняшний день многие коллективы предлагают свои решения этой проблемы с использованием различных современных технологий, в том числе робототехники [3], [4] и CDF-расчётов [5].

Оптимизировать распределение потока УФ-приборов можно с помощью выбора компоновки облучателя, увеличив его коэффициент использования бактерицидного потока. Это позволит набирать заданную дозу быстрее, что даст возможность потенциальному использовать облучатель более эффективно, например, обработать

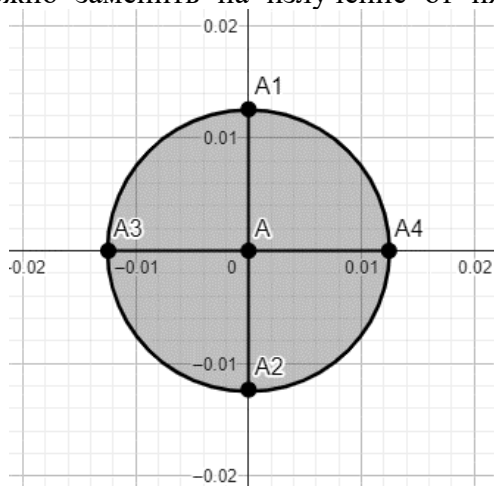
больше помещений за то же время, или одно, но за меньший промежуток времени, что важно, например, при обработке операционных в медучреждениях. В тех случаях, когда скорость обработки не существенно важна, сокращение времени экспозиции поможет сэкономить электроэнергию. Сэкономить время и ресурсы на поиск решения для оптимальной компоновки облучателя поможет компьютерное моделирование.

Модели осветительных приборов

В рамках данной работы рассматривались только приборы, лампы которых расположены вертикально. Однако, такой метод применим и в других случаях, когда оси ламп параллельны друг другу.

В работе была составлена модель лампы как в роли излучателя, так и объекта, поглощающего излучение. Под этим определением стоит понимать, что вопреки общей практике представления лампы в виде «тонкого светящегося отрезка», были учтены конечные размеры лампы, более подробно модель будет описана ниже.

Задачу определения уровня затенённости можно упростить, рассматривая систему в горизонтальной плоскости, проходящей через центры «светящихся отрезков» (ламп) и расположенной перпендикулярно осям ламп. При этом лампы представляют из себя набор кругов, как и силовые элементы, в случае с используемой в нашем опыте установкой. Пример такого набора можно наблюдать на рис. 1. Излучение от УФ лампы в таком сечении можно заменить на излучение от пяти отдельных точечных источников, как



показано на

рис. 2, с целью ограничения количества объектов, участвующих в моделировании. Точечные источники помещаются в центр окружности и концы двух перпендикулярных диаметров, каждый из которых параллелен своей оси координат. В модель можно включить любое количество ламп, произвольно задать их позиции и назначить коэффициенты поглощения УФ-излучения для различных объектов.

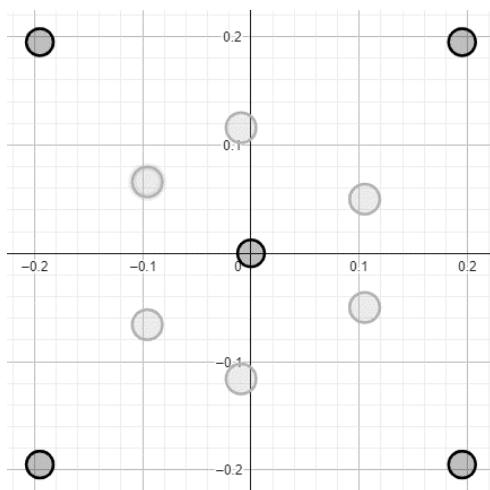


рис. 1

Представление облучателя в сечении горизонтальной плоскостью.

Тёмные круги – элементы конструкции
светлые круги – лампы.

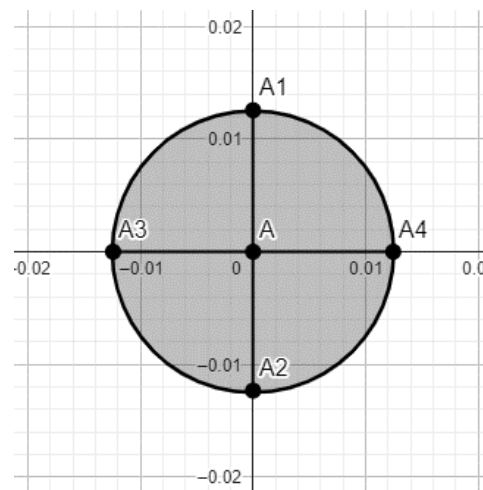


рис. 2

Излучение от УФ-лампы в плоскости заменяется пятью точечными источниками.

Для каждой расчётной точки пространства необходимо перебрать все объекты системы и рассчитать, какие точечные источники закрыты другими объектами, что уменьшит дозу УФ-излучения, полученную этой точкой пространства. То есть, был реализован двойной полный перебор всех объектов системы для каждой из точек той части пространства, в которой проводится расчёт.

Для расчёта облучённости, создаваемой в расчётной точке пространства, была использована формула Кайтца, утверждённая IUVA в 2017 году [6]:

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

где $\Phi[\text{Вт}]$ – энергетический поток или поток излучения, $E[\text{Вт/м}^2]$ – энергетическая освещённость или облучённость, $L[\text{м}]$ – протяжённость источника света, $D[\text{м}]$ – нормальное расстояние от точки наблюдения до источника, $\alpha[\text{рад}]$ – угол, под которым видна лампа из точки наблюдения, который вычисляется по формуле:

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

Для удобства представления результатов, а также для ограничения области расчёта, вычисления проводились в 568 точках, равномерно распределённых на окружности с радиусом 3 метра от центра облучателя. Такое число точек выбрано для удобства сопоставления результатов расчёта с результатами измерений радиометром. Замена лампы на 5 точечных источников света плохо моделирует излучение на расстояниях порядка радиуса лампы, однако на расстояниях много больше радиуса лампы.

Представленная модель позволяет смоделировать распределение потока УФ-излучения от системы излучателей с соосным расположением ламп и основных силовых элементов конструкции на расстояниях много больших радиуса лампы. Вместо элементов круглого сечения можно включить в модель и другие формы.

Расчёт затенения

В качестве модельного объекта с целью дальнейшей верификации расчётной модели облучателя был выбран типовой образец напольного облучателя, в конструкции которого

использованы вертикальные силовые элементы - металлические трубы круглого сечения в углах конструкции и в её центре. Таким образом, силовые элементы составляют пять препятствий, угловые, в свою очередь, являются так же границей облучателя. Количество ламп и их расположение можно выбрать любым способом внутри габаритов, в данном исследовании рассмотрены случаи для трёх, четырёх, шести и восьми ламп, расположенных симметрично относительно центра.

Известно, что газовый разряд ртутных ламп эффективно генерирует и поглощает излучение на длине волны 254нм из бактерицидной части УФ-диапазона [7]. Кварцевая колба лампы и газовый разряд обладают конечным коэффициентом пропускания. Для того, чтобы выяснить, сколько излучения поглощает горящая лампа, был проведён отдельный эксперимент. Опыт был поставлен таким образом: две лампы располагались друг за другом, на некотором удалении от них находился УФ-радиометр, измеряющий интенсивность УФ-излучения обеих ламп; интенсивность от ламп измерялась сначала по отдельности, затем суммарная, при этом излучение дальней лампы имел возможность попасть в датчик только при прохождении через ближнюю лампу. Схема эксперимента

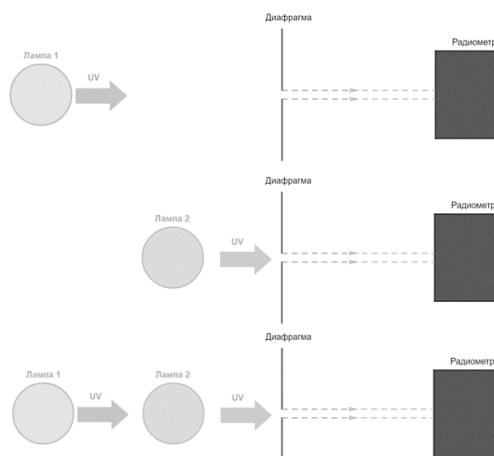


рис. 3

Схема эксперимента для определения коэффициента поглощения УФ-излучения газоразрядной лампой низкого давления.

представлена на рис. 3.

В результате эксперимента было установлено, что горящая лампа пропускает через себя $15 \pm 3\%$ света другой такой же УФ лампы, стоящей строго за ней. Эта информация была учтена в расчётной модели с помощью коэффициента поглощения УФ-излучения, о котором говорилось ранее. Таким образом, хотя каждая лампа является источником УФ-излучения, она также представляет собой препятствие для излучения от других ламп с коэффициентом поглощения 0.85.

Проверка расположения отрезков препятствий C-D на пути распространения луча, исходящего от источника излучения A и приходящего в точку наблюдения B, проводилась с помощью условия: если результаты векторных произведений $[\vec{AC}, \vec{AD}]$ и $[\vec{BC}, \vec{BD}]$ имеют разные знаки, а также результаты векторных произведений $[\vec{CA}, \vec{CB}]$ и $[\vec{DA}, \vec{DB}]$ имеют разные знаки, тогда \vec{AB} и \vec{CD} имеют пересечение в некоторой точке, как это показано на рис. 4.

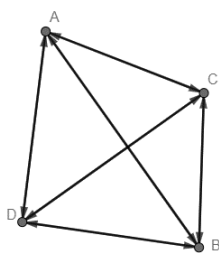


рис. 4

Случай пересекающихся отрезков AB и CD. Видно, что вышеуказанные векторные произведения имеют разные знаки.

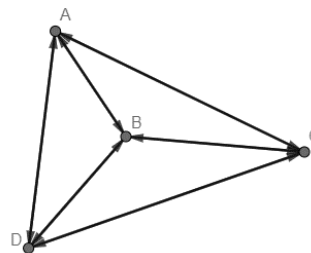


рис. 5

Случай не пересекающихся отрезков AB и CD. Видно, что указанные векторные произведения $[\vec{AC}, \vec{AD}]$ и $[\vec{BC}, \vec{BD}]$ имеют одинаковые знаки.

Так перебирая все точечные источники излучения и все препятствующие отрезки, можно сделать расчёт потока УФ-излучения от системы ламп с учётом затенений для любой интересующей точки пространства.

Эксперимент

Экспериментальная установка, то есть стенд-облучатель, представлял собой платформу на колёсах, на которой через опорный подшипник был установлен короб с электронным оборудованием для работы ламп и устройствами крепления для ламп и металлических трубок, служащих моделями силовых элементов. На центральной опоре был зафиксирован сменный кронштейн, на котором были закреплены пружинные полукольца для крепления ламп в различных положениях внутри габаритов установки. Лампы, закреплённые в полукольцах, расположены вертикально, так что, они остаются параллельными друг другу. В нашем случае использовались прямые газоразрядные лампы низкого давления, мощностью 105 Ватт на длине волны 254нм. Лампы имеют диаметр 28мм, а все силовые элементы – 25мм. Для измерений облучённости, создаваемой облучателем, на расстоянии 3 метра от центральной опоры на высоте, середины лампы располагался солнечнослепой датчик SED240\W радиометра ILT5000, имеющий максимум чувствительности на длине волны 254нм. Расстояние в 3 метра выбрано как оптимальное для диапазона линейности измерений датчиком, сам же датчик в ходе проведения измерения оставался неподвижным. Стенд с горящими лампами вращался на опорном подшипнике, и в этот же момент времени радиометром измерялась облучённость в выбранном направлении, относительно выбранной конфигурации ламп и силовых элементов стенда. Таким образом выяснялось распределение УФ-излучения в различных направлениях вокруг облучателя. За стендом с лампами стояла ширма из чёрной ткани, минимизирующая отражения от стен, пола, потолка и других объектов в помещении.

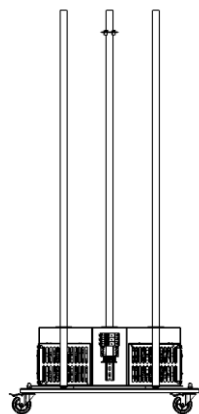


рис. 6

Стенд-облучатель, вид сбоку

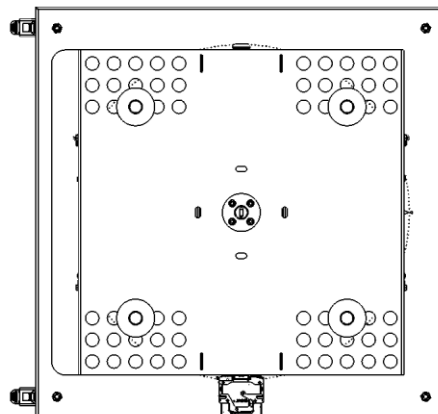


рис. 7

Стенд-облучатель, вид сверху

В испытаниях были проверены 4 компоновки – из трёх, четырёх, шести и восьми ламп. Во всех четырёх случаях лампы располагаются симметрично относительно центра установки. Когда использовались 3 (рис. 10) или 4 (рис. 8) лампы, они распределяются равномерно по всей окружности, а в случаях, когда ламп было 6 (рис. 1) или 8 (рис. 9), то они разбивались на пары, и уже сами пары распределялись равномерно по окружности. Расстояние между центрами ламп в парах составляло 10,5 см, а их взаимное расположение таково, что отрезок, соединяющий центры ламп в паре, перпендикулярен радиусу, проведённому из центра установки к его середине. Такое расположение моделирует устройства, присутствующие на рынке в данный момент.

Измерение интенсивности для каждой компоновки проводилось в 284 точках, распределённых равномерно вокруг стенда на расстоянии 3 метра. Полученные данные нормировались на расчётное значение – облучённость, которую зарегистрировал бы датчик от эквивалентного по размерам источника с мощностью, равной суммарной мощности от всех ламп. В одной из точек получившейся зависимости будет располагаться глобальный минимум, значение в котором и является коэффициентом использования бактерицидного потока. Перебирая различные конфигурации и определяя для них коэффициент использования бактерицидного потока, можно выделить оптимальную конфигурацию источников излучения.

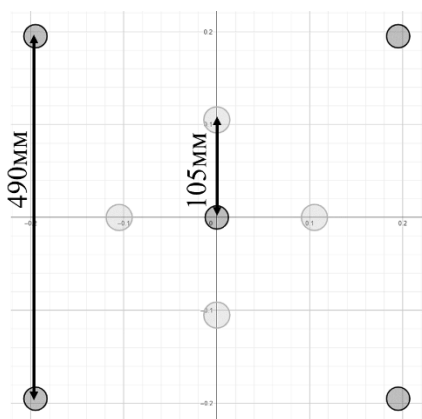


рис. 8

Пример компоновки четырёхламповой системы.

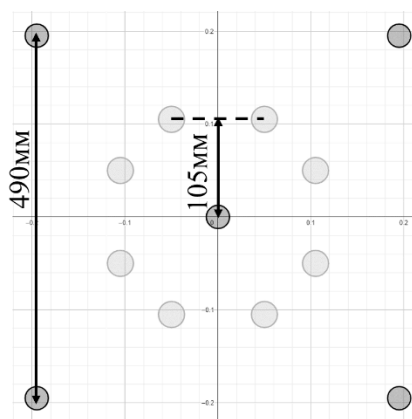


рис. 9

Пример компоновки восьмиламповой системы.

Исходный радиус, на котором расположены лампы, выбран равным 10.5см – пунктирная окружность на рисунке ниже. Лампы можно сдвинуть, как внутрь установки, так и наружу – за это отвечает вектор \vec{dr} с соответствующим индексом. Таким образом, изменяя \vec{dr} на всех лампах одновременно, и измеряя индикатрису, были получены данные о зависимости распределения интенсивности от параметра \vec{dr} . При этом, направление векторов $\vec{R}_1, \vec{R}_2, \vec{R}_3$ не изменяется. Расчёты проводились с тем же набором конфигураций (или компоновок), что и эксперименты, чтобы в дальнейшем можно было сопоставить полученные результаты.

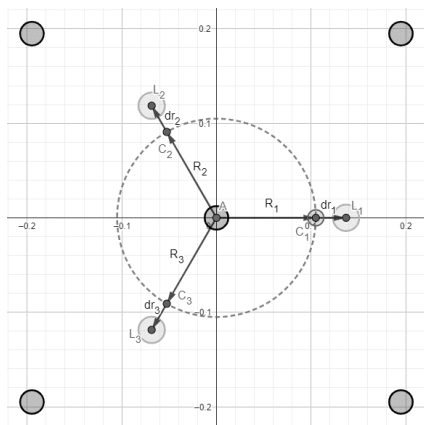


рис. 10

Пояснительный рисунок к введённой системе параметров.

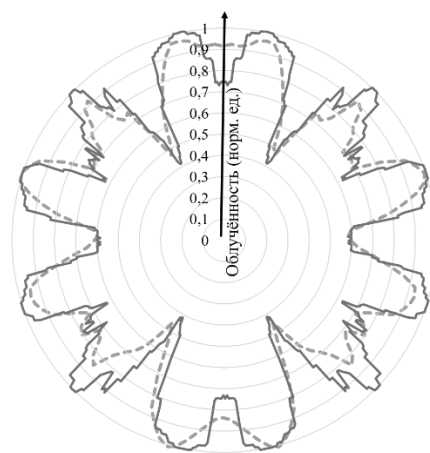


рис. 11

Пример сравнения экспериментально измеренной индикатрисы (пунктирная линия) и полученной при расчёте математической модели (сплошная линия).

В компоновке использовалось 6 ламп.

Результаты эксперимента

На рис. 11 изображен пример распределения УФ-излучения вокруг облучателя для трехламповой конфигурации, нормированной на облучённость, которую бы реализовал эквивалентный по размерам источник мощностью, равной суммарной мощности от всех ламп. На рис. 11 можно видеть пример распределения УФ-излучения вокруг выбранной компоновки, а на рис. 12 - рис. 15 представлены результаты измерения и моделирования, показывающие зависимость коэффициента использования бактерицидного потока от \vec{dr} в различных компоновках.

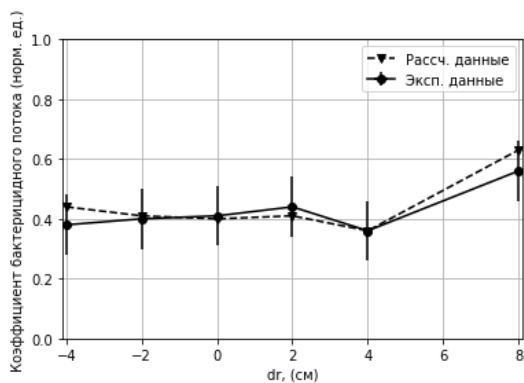


рис. 12

Зависимость k от радиуса расположения ламп в 3-ламповой установке.

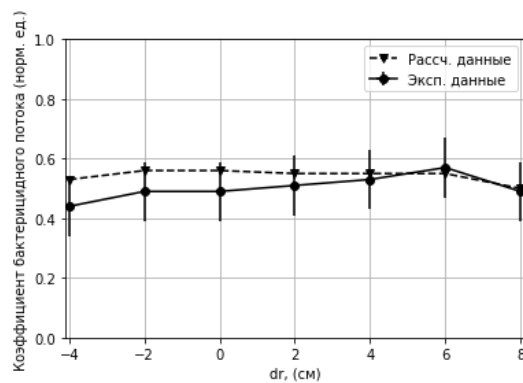


рис. 13

Зависимость k от радиуса расположения ламп в 4-ламповой установке.

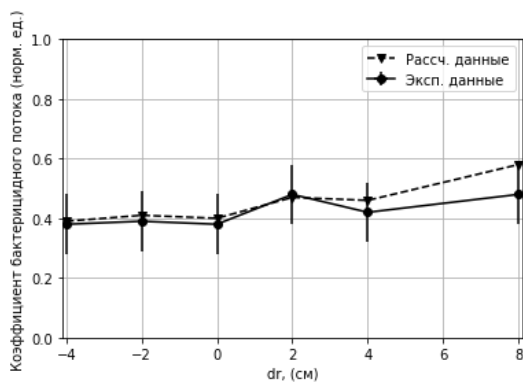


рис. 14

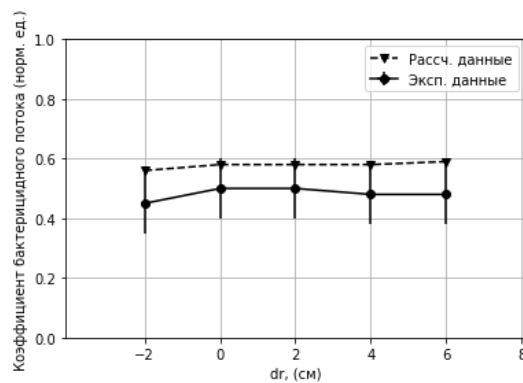


рис. 15

Зависимость k от радиуса расположения ламп
в 6-ламповой установке.

Зависимость k от радиуса расположения ламп
в 8-ламповой установке.

Сравнивая рис. 14 и рис. 12, можно заметить схожую зависимость уровня затенённости от \vec{dr} – возрастание отношения минимальной интенсивности к расчётной при приближении \vec{dr} к 8.

Сравнение данных, полученных из непосредственных измерений, с данными, полученными в результате компьютерного моделирования, показало, что составленная модель хорошо предсказывает общее поведение системы и абсолютные значения.

Наиболее важный вывод, который можно сделать из полученных данных – для улучшения ключевых характеристик в работе облучателей, включающих в себя несколько ламп, необходимо исследовать компоновку на оптимальное расположение источников. Если посмотреть на график зависимости коэффициента использования бактерицидного потока от \vec{dr} для шестиламповой или трёхламповой системы, можно заметить, что при увеличении радиуса, на котором расположены лампы, можно повысить коэффициент использования бактерицидного потока с 40% до 60%. Такая оптимизация компоновки позволит уменьшить время обработки в 1.5 раза, что позволяет более эффективно использовать электроэнергию и ресурс лампы.

Кроме того, есть заметная тенденция к увеличению степени затенённости с увеличением количества ламп, что выводит на передний план дополнительную задачу: повышение единичной мощности и КПД газоразрядных ламп низкого давления, используемых в облучателях. Облучатели, имеющие в своей конструкции большое количество устаревших ртутных ламп, всегда будут иметь низкий коэффициент использования бактерицидного потока и проигрывать в эффективности современным устройствам с небольшим числом мощных и эффективных ламп.

Заключение

Проведённые в рамках данной работы исследования показали, что на этапе проектирования напольных облучателей, включающих в свою конструкцию несколько газоразрядных ламп, необходимо производить расчёты распределения ультрафиолетового излучения вокруг установки с целью подобрать оптимальную компоновку для проектируемого оборудования. Как показали серии экспериментов с конкретными примерами облучателей, в отдельных случаях коэффициент использования бактерицидного потока можно повысить до 60%, что означает уменьшение времени обработки в 1.5 раза. Благодаря расчётной модели распределения УФ-излучения, описанной в данной работе, можно производить вычисления коэффициента бактерицидного потока для различных конфигураций ламп ещё на этапе проектирования облучателя и его компоновки.

Литература

- [1] Костюченко С.В., Васильев А.И., Ткачев А.А., и др., «Изучение эффективности применения ультрафиолетовых бактерицидных установок (УФ-рециркуляторов) закрытого типа для обеззараживания воздушной среды помещений,» *Гигиена и санитария*, т. 100, № 11, pp. 1229-1235, 2021.
- [2] Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В. и др. , Ультрафиолетовые технологии в современном мире, Долгопрудный: ИД "Интеллект", 2012.

- [3] Stepan Perminov, Nikita Mikhailovskiy, Alexander Sedunin, and other, «UltraBot: Autonomous Mobile Robot for Indoor UV-C Disinfection,» *17th International Conference on Automation Science and Engineering*, № 17, pp. 2147-2152, август 2021.
- [4] C. W. Haag, G. Holliday, K. Archulet, W. Tang , «Comparing UV-C dosages of emitter placement strategies in a community hospital setting,» *Infection Control & Hospital Epidemiology*, т. 44, № 9, pp. 1505-1507, 2023.
- [5] S. Jin, K.G. Linden, J. Ducoste, D. Liu, «Impact of lamp shadowing and reflection on the fluence rate distribution in a multiple low-pressure UV lamp array,» *Water Research*, т. 39, № 12, pp. 2711-2721, 2005.
- [6] С. а. о. т. I. M. Council, «Method for the Measurement of the output of Monochromatic (254 nm) Low Pressure UV Lamps,» 2017.
- [7] Бугаев А.С., Шешин Е.П., Озол Д.И., Мье М.М., Данилкин М.И., Верещагина Н.Ю., «Современные направления развития УФ-излучения бактерицидного диапазона,» *Вестник Московского государственного областного университета*, 2017.