

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

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

Аннотация

Представлен метод расчёта распределения интенсивности для систем ламп в напольных ультрафиолетовых облучателях. 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: напольные облучатели, 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 дальнейшим размножением и образованием колоний, что называется инактивацией. Для гарантированной инактивации микроорганизмов на единице какой-либо поверхности, необходимо чтобы она за время обработки набрала заранее определённую дозу облучения. Доза, в свою очередь пропорциональна времени обработки и интенсивности излучения, приходящего на поверхность от облучателя. Вследствие наличия конструктивных особенностей облучателя, излучение, генерируемое УФ-источниками облучателя распределяться 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 соседствующие поверхности наберут различную дозу за время экспозиции, что в случае недобора приведёт к недостаточной степени обеззараживания, а в случае перебора дозы – к преждевременной деградации материалов поверхности. Иными словами, существующая проблема неравномерного распределения светового потока от облучателей решена тривиально, но совсем 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 светового потока от УФ-приборов можно с помощью выбора компоновки облучателя, увеличив его коэффициент использования

бактерицидного потока. Это позволит набирать заданную дозу быстрее - сократит время обработки помещения и поможет сэкономить электроэнергию, увеличив долю УФ-излучения, которое попадёт на заражённые поверхности. Сэкономить время и ресурсы на разработку 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.

Основной задачей данной работы было составить достаточно правдоподобную физическую модель лампы как излучателя, так и препятствия для излучения. Под этим определением стоит понимать, что вопреки общей практике представления лампы в виде «тонкого светящегося отрезка», будут учитываться конечные размеры лампы, более подробно модель будет описана ниже. Задачу определения уровня затенённости можно упростить, рассматривая систему в горизонтальной плоскости, проходящей через центр «светящегося отрезка».

Лампы в таком сечении станут набором кругов, как и силовые элементы, в случае с используемой в нашем опыте установкой. Окружности заменены пятью расчётными точками с целью ограничения количества объектов, участвующих в моделировании. Этими пятью точками являются центр окружности и концы двух перпендикулярных диаметров, каждый из которых параллелен своей оси координат.

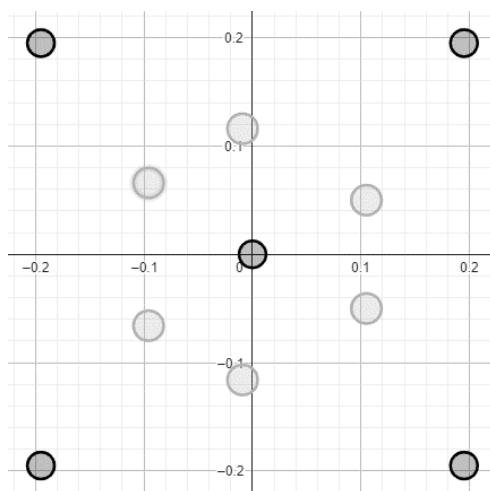


рис. 1

Представление облучателя в сечении горизонтальной плоскостью.

Тёмные круги – элементы конструкции, светлые круги – лампы.

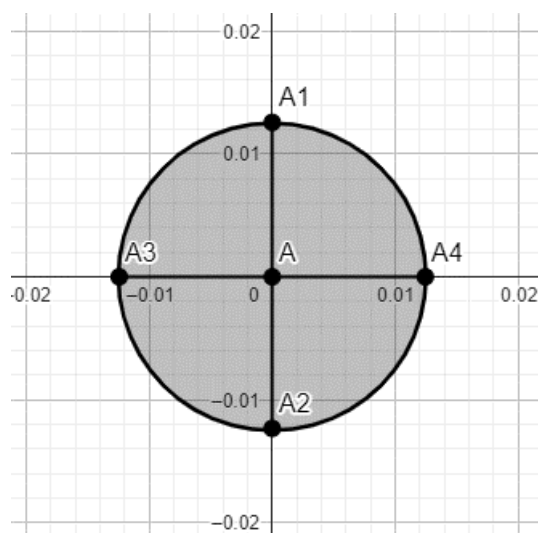


рис. 2

Переход от кругов к набору из пяти расчётных точек.

Крест, который представляет собой модель лампы будем называть светящим, а крест-модель силовой конструкции – препятствием. Источником света будут центральные точки в светящих крестах, остальные точки будут участвовать в расчёте затенения других ламп. Для каждой точки пространства необходимо перебрать все объекты системы и рассчитать, какие из ламп закрыты другими объектами и уменьшают вклад в дозу, 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.

Разработанная модель позволяет смоделировать систему с вертикальным расположением ламп и силовых элементов конструкции, используя всего по 5 точек на каждый элемент, что значительно упрощает дальнейшие расчёты.

Расчёт затенения

В качестве модельного объекта с целью дальнейшей верификации 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 может не только излучать свет на определённых длинах волны, но и поглощать его на тех же длинах. Кварцевая колба лампы и газовый разряд обладают конечным коэффициентом пропускания. Для того, чтобы выяснить, насколько горящая лампа затеняет излучение других ламп, был проведён отдельный опыт. Опыт был поставлен таким образом: две лампы располагались друг за другом, на некотором удалении от них находился УФ-радиометр, регистрирующий интенсивность, исходящую от обеих ламп; интенсивность от ламп измерялась сначала по-отдельности, затем суммарная, при этом свет от дальней лампы имел возможность попасть в датчик только при прохождении через ближнюю лампу; все измерения проводились в рабочем режиме лампы (на «полке»); вычитая из суммарной интенсивности, интенсивность ближней лампы, можно понять, какая доля интенсивности пришла в датчик от дальней лампы. 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. Таким образом, хотя каждая лампа является источником света, она также представляет собой препятствие для света от других ламп с коэффициентом пропускания, отличным от нуля.

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 \overline{AB} и \overline{CD} имеют пересечение в некоторой точке.

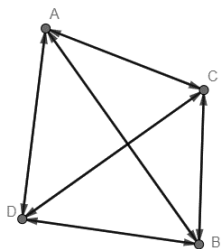


рис. 3

Случай пересекающихся отрезков AB и CD.

Видно, что вышеуказанные векторные произведения имеют разные знаки.

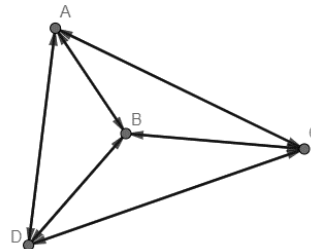


рис. 4

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 светящиеся точки и все препятствующие отрезки, можно сделать расчёт светового потока от системы ламп с учётом затенений для любой интересующей точки пространства.

Эксперимент

Экспериментальная установка, то есть стенд-облучатель, представляет собой платформу на колёсах, на которой через опорный подшипник установлен короб с электронным оборудованием для работы ламп и устройствами крепления для ламп и металлических трубок, служащих моделями силовых элементов. На центральной опоре зафиксирован сменный кронштейн, на котором закреплены пружинные полукольца для закрепления 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. Они имеют диаметр 28мм, а все силовые элементы – 25мм. На расстоянии 3 метра от центральной опоры на высоте, середины лампы располагается радиометр ILT5000 с солнечнослепым датчиком SED240\W, имеющим максимум чувствительности на длине волны 254нм. Стенд можно вращать на опорном подшипнике и таким образом измерять интенсивность светового поля в различных направлениях от облучателя. То есть, строить индикатрису облучённости, создаваемую облучателем. Расстояние в 3 метра было определено как оптимальное для проведения измерений радиометром.

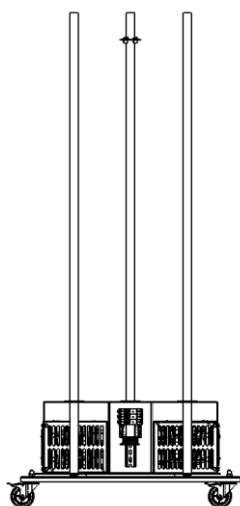


рис. 5
Стенд-облучатель, вид сбоку

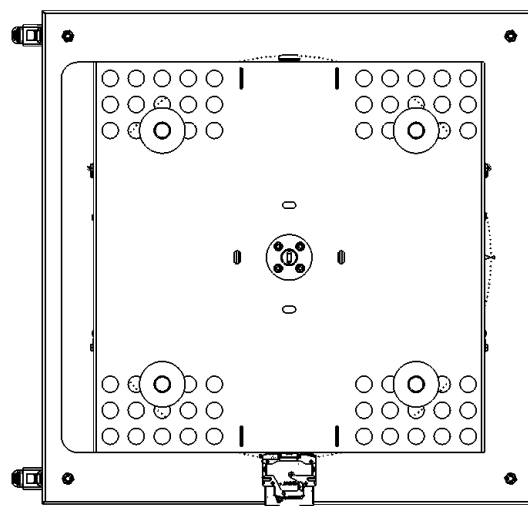


рис. 6
Стенд-облучатель, вид сверху

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. 9) или 4 (рис. 7) лампы, они распределяются равномерно по всей окружности, а в случаях, когда ламп было 6 (рис. 1) или 8 (рис. 8), 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.

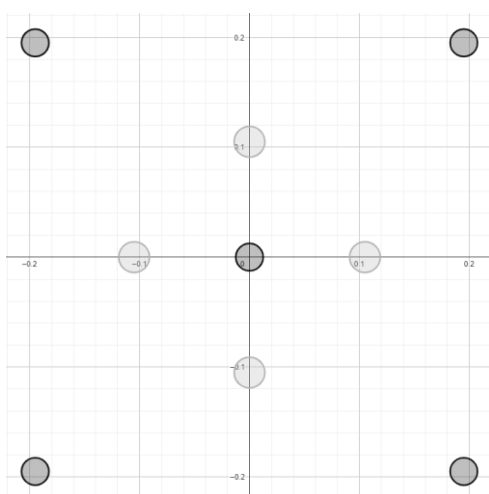


рис. 7
Пример компоновки четырёхламповой системы.

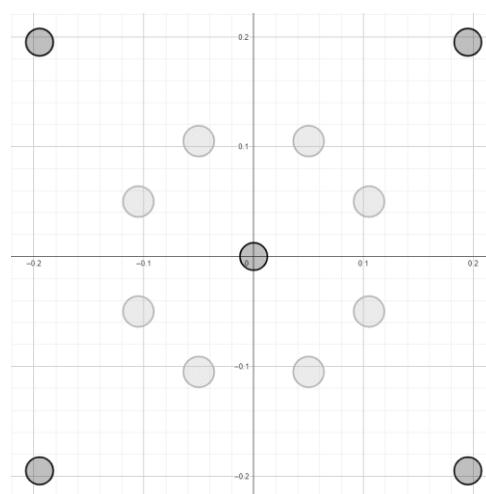


рис. 8
Пример компоновки восьмиламповой системы.

Измерения облучённости для каждой компоновки проводились в 284 различных точках, распределённых по всей окружности равномерно и для 6-8 различных радиусов расположения ламп. Целью испытания является нахождение такого радиуса расположения ламп для каждой компоновки, при котором минимальная интенсивность будет наибольшей. После нормировки на суммарную интенсивность всех ламп без учёта затенений эта величина представляет собой коэффициент использования бактерицидного потока, который и необходимо максимизировать. Иначе говоря, производится поиск конфигурации с минимальным затенением. Для каждой конфигурации производится расчёт по математической модели, описанной выше, с целью сравнения расчётных данных с полученными экспериментально.

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 будет отвечать вектор dr с соответствующим индексом. Таким образом, изменяя dr на всех лампах одновременно, и измеряя индикатрису, были получены данные о зависимости распределения интенсивности от параметра dr . При этом, направление векторов R_1, R_2, R_3 не изменяется.

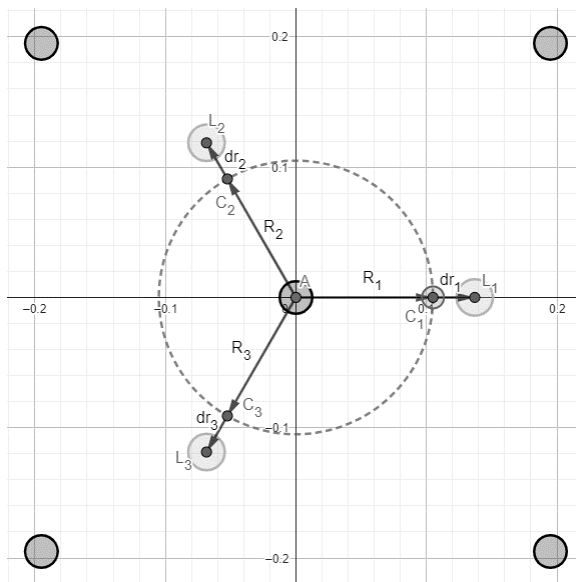


рис. 9

Пояснительный рисунок к введённой системе параметров.

Результаты эксперимента

На рис. 10 изображен пример индикатрисы для трехлампового источника УФ-излучения, нормализованной на значение, рассчитанное с помощью метода, описанного в руководстве Р 3.5.1904-04, без учета корректирующего коэффициента. (Для каждой системы ламп это значение своё, в дальнейшем будем называть его «референсным» - ref.) На полученной индикатрисе были интересны два значения: минимальное (\min) и максимальные (\max), они представляют практический интерес. Величин равная $\frac{\min}{\text{ref}}$ и есть коэффициент использования бактерицидного потока (далее k). Все полученные данные приведены ниже на рис. 11 - рис. 14.

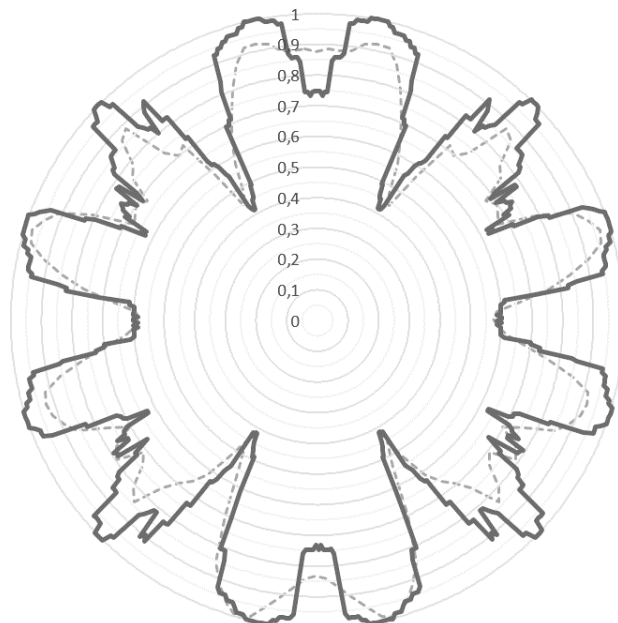


рис. 10

Пример сравнения экспериментально измеренной индикатрисы (пунктирная линия) и полученной при расчёте математической модели (сплошная линия).
В компоновке использовалось 6 ламп.

Результаты измерений и компьютерного моделирования показывают сходство тенденций и близкие абсолютные значения, что подтверждает достоверность и точность модели. На рис. 11 представлены результаты в графическом виде.

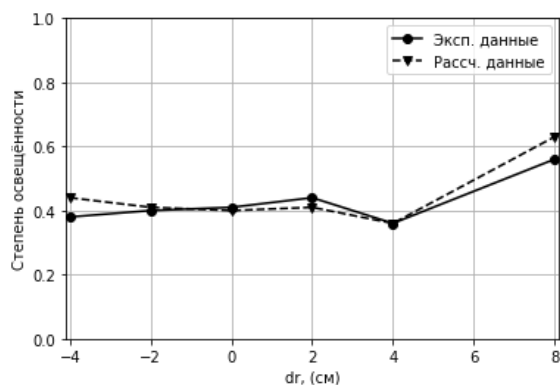


рис. 11

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

На рис. 11 виден характерный минимум в точке $dr = 4$ и для модели, и для реального объекта. А также глобальный максимум в точке $dr = 8$.

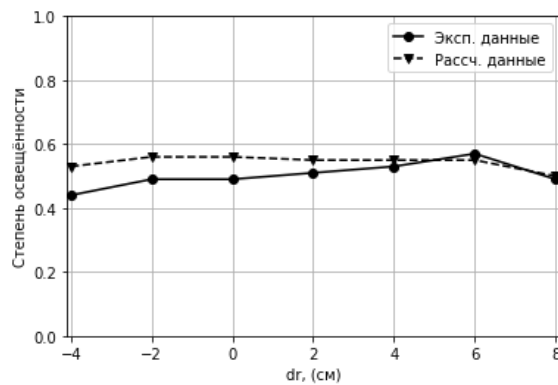


рис. 12

Зависимость k от радиуса расположения ламп в 4-ламповой установке.
Референсное значение 1.61.

Расчётная модель показывает, что изменение dr практически не влияет на затенённости системы в пределах $[-2; 6]$, в то время, как физическая модель облучателя демонстрирует незначительное уменьшение уровня затенённости.

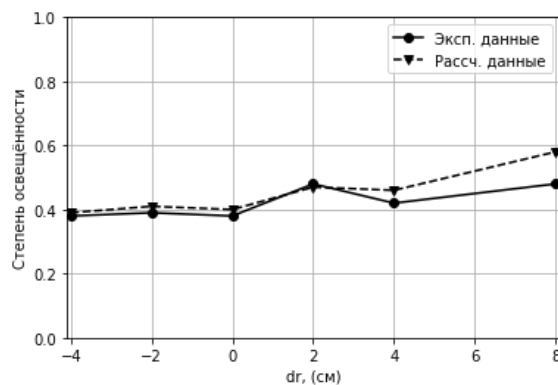


рис. 13

Зависимость k от радиуса расположения ламп в 6-ламповой установке.
Референсное значение 2.41.

Сравнивая рис. 13 и рис. 11, можно заметить схожую зависимость уровня затенённости от dr — возрастание отношения минимальной интенсивности к расчётной при приближении dr к 8.

Результаты измерений и моделирования для компоновки с восемью лампами (рис. 8), нормированные на референсное значение 3.27 представлены на рис. 14.

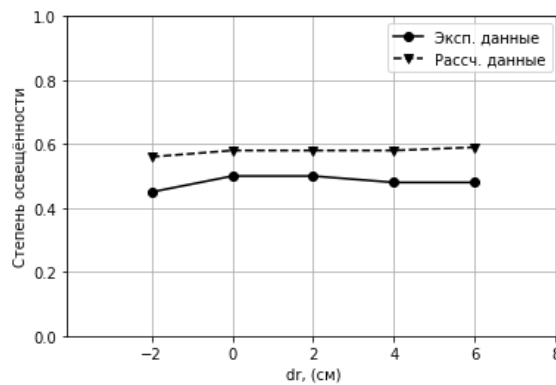


рис. 14

Зависимость степени освещённости от радиуса расположения ламп в 8-ламповой установке.
Референсное значение 3.27.

Экспериментальные измерения и результаты моделирования согласованно говорят о низкой зависимости степени затенённости от dr .

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 минимальной интенсивности от 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 экономно расходовать электроэнергию и ресурс лампы, и, как следствие, не допускать излишней облучённости поверхностей, приводящей к их деградации.

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.

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. Кроме того, расчётная модель, введённая в данной работе, дала результаты, по которым можно не только определять коэффициент использования бактерицидного потока, но и определять направления, в которых ультрафиолетовое излучение распространяется наиболее интенсивно.

Литература

1. *Изучение эффективности применения ультрафиолетовых бактерицидных установок (УФ-рециркуляторов) закрытого типа для обеззараживания воздушной среды помещений.* **Костюченко С.В., Васильев А.И., Ткачев А.А., и др.** 11, 2021 г., Гигиена и санитария, Т. 100, стр. 1229-1235.
2. **Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В. и др. .** *Ультрафиолетовые технологии в современном мире.* Долгопрудный : ИД "Интеллект", 2012.
3. *UltraBot: Autonomous Mobile Robot for Indoor UV-C Disinfection.* **Stepan Perminov, Nikita Mikhailovskiy, Alexander Sedunin, and other.** 17, Lyon, France : IEEE, август 2021 г., 17th International Conference on Automation Science and Engineering, стр. 2147-2152.
4. *Comparing UV-C dosages of emitter placement strategies in a community hospital setting.* **C. W. Haag, G. Holliday, K. Archulet, W. Tang .** 9, 2023 г., Infection Control & Hospital Epidemiology, Т. 44, стр. 1505-1507.
5. *Impact of lamp shadowing and reflection on the fluence rate distribution in a multiple low-pressure UV lamp array.* **S. Jin, K.G. Linden, J. Ducoste, D. Liu.** 12, 2005 г., Water Research, Т. 39, стр. 2711-2721.