Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Физтех-школа аэрокосмических технологий

Кафедра «Системы, устройства и методы геокосмической физики»

**Направление подготовки**: 03.03.01 Прикладные математика и физика  
**Направленность (профиль) подготовки**: Геокосмические науки и технологии

**ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРИКЛАДНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ УСТРОЙСТВ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**(бакалаврская работа)

**Студент:**

Науменко Данила Евгеньевич

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*(подпись студента)*

**Научный руководитель:**

Левченко Владимир Александрович,

кандидат физ.-мат. наук

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*(подпись научного руководителя)*

Москва 2024

# Аннотация

Исследуется распределение ультрафиолетового излучения в пространстве вокруг напольных облучателей открытого типа с различным количеством и расположением ламп. Работа велась над установками, включающими в себя систему газоразрядных амальгамных ламп низкого давления и силовых непрозрачных элементов конструкции круглого сечения. Была составлена расчётная модель облучателя, учитывающая точки расположения и размеры всех излучающих и поглощающих элементов конструкции. Результаты расчётов в хорошей степени совпадают с результатами, полученными в ходе экспериментов, и указывают на то, что конструкции типовых облучателей могут быть улучшены.

СОДЕРЖАНИЕ

[Аннотация 2](#_Toc164866216)

[Введение 5](#_Toc164866217)

[Бактерицидное действие ультрафиолетового излучения 5](#_Toc164866218)

[Традиционные методы вычисления облучённости лампы 7](#_Toc164866219)

[Конструкция амальгамных газоразрядных ламп низкого давления 9](#_Toc164866220)

[Энергетическая эффективность 9](#_Toc164866221)

[Мировой опыт решения проблемы 10](#_Toc164866222)

[Теоретическая часть 11](#_Toc164866223)

[Методы расчёта и контроля облучённости 11](#_Toc164866224)

[Модель лампы 12](#_Toc164866225)

[Модель расчёта затенения 13](#_Toc164866226)

[Практическая часть 16](#_Toc164866227)

[Определение коэффициента поглощения горящей газоразрядной лампы 16](#_Toc164866228)

[Определение мощности точечных источников излучения в модели лампы 18](#_Toc164866229)

[Исследование распределения излучения в пространстве вокруг открытых облучателей 19](#_Toc164866230)

[Список используемой литературы 20](#_Toc164866231)

# Введение

С увеличением плотности населения отдельных областей земного шара всё острее становится проблема борьбы с микроорганизмами, способными вызывать у человека заболевания различной тяжести вплоть до летального исхода. Пандемия COVID-19 в 2019-2021 годах показала, что на данный момент всё ещё существует реальная угроза глобального распространения вирусных заболеваний. Одним из способов борьбы с вредоносными микроорганизмами является обработка заражённых поверхностей и воздуха ультрафиолетовым излучением [1] [2] [3] [4]. За последние несколько лет изделия для обеззараживания воздуха и поверхностей, то есть облучатели открытого типа, получили сильное распространение [5] [6]: они широко начали использоваться образовательными учреждениями, заведениями общественного питания, транспортными компаниями и отелями. Основными требованиями к такому оборудованию являются:

1. Скорость обработки – ультрафиолетовое излучение бактерицидного диапазона опасно не только для микроорганизмов, но и для органов человека, поэтому обработка облучателями производится только в отсутствие людей [7]. То есть рабочее коммерческое помещение не сможет выполнять свои прямые задачи в течение времени обработки. Для повышения скорости обработки, производители разрабатывают всё более и более мощное оборудование.
2. Энергетическая эффективность – это требование продиктовано не только простыми экономическими соображениями, но и ограниченными техническими возможностями электрических сетей. Повышение потребляемой мощности означает возрастание тока в сети, что налагает ограничение на её использование, так как электрическая автоматика [8] рассчитана на пропускание через себя тока ограниченной величины.

Производители оборудования для обработки поверхностей и воздуха ультрафиолетовым излучением в конкурентной борьбе пытаются как можно лучше реализовать оба запроса. Одной из современных технологий, способной помочь в решении данных задач является компьютерное моделирование.

## Бактерицидное действие ультрафиолетового излучения

Ультрафиолетовое излучение (УФИ) – это часть спектра электромагнитного излучения, длина волны которого лежит в диапазоне 10 - 400 нм. Этот диапазон принято разделять на 4 диапазона: A – 400-315 нм, B – 315-280 нм, C – 280-200 нм. Бактерицидные свойства УФИ были впервые обнаружены в 1876 году А. Даунсом и Т. Блантом [9]. В 1961 году Р. Бекерс и У. Берендс [10] обнаружили реакцию ультрафиолета непосредственно с тимином – одним из пяти азотистых оснований ДНК; это открытие объяснило бактерицидную эффективность С-диапазона УФИ. То есть, при прохождении через микроорганизмы фотоны с длинами волн, относящихся к ультрафиолетовому диапазону, взаимодействует с различными компонентами клетки, в частности, с ДНК и РНК, что приводит к их повреждениям и, следовательно, к деактивации механизмов размножения микроорганизмов [11]. Этот эффект ультрафиолетового излучения называют бактерицидным. Для разных микроорганизмов, в силу их биологических и химических [12] особенностей, восприимчивость к излучению различных длин волн будет разной [13] [14], поэтому эмпирическим путём была установлена оптимальная длина волны, обеспечивающая примерно равную бактерицидную эффективность для большинства опасных микроорганизмов. Эта оптимальная длина волны, равная нм, называется максимумом бактерицидной чувствительности [15]. Другие длины волн УФ диапазона тоже имеют бактерицидный эффект, однако, для некоторых микроорганизмов он может быть менее выраженный. Повреждения ДНК или РНК могут не приводить к уничтожению микроорганизма, но лишают его возможности размножаться, а значит, и провоцировать заболевания. При низком давлении паров ртути в газоразрядной лампе, большее количество энергии (до 80%) приходится на резонансное излучение с уровней и , излучение которых переносится на длинах волн 253,7 нм и 185 нм соответственно [16]. В обзорной статье по эксимерным лампам [17] приведён график спектральной чувствительности для *E. coli*, и ДНК, а также атомарная линия ртути 253,7 нм (Рис. 1):

|  |
| --- |
| Рис. 1. Спектральная чувствительность ДНК к УФИ. 1 – Спектр инактивирующего действия УФ излучения на E. Сoli, 2 – интегральный спектр поглощения ДНК. |

Целью обработки поверхностей ультрафиолетовым излучением бактерицидного диапазона является нанесение необходимого количества повреждений микроорганизмам в зоне обработки. Получаемый микроорганизмами урон от излучения можно свести к дозе излучения, приходящего на единицу поверхности:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

где – полученная доза, – облучённость на бактерицидной длине волны в точке наблюдения, – время облучения. Согласно [18] облучённость – это усреднённое по времени количество энергии, проходящее через заданную площадь.

## Традиционные методы вычисления облучённости лампы

В расчётах облучённости излучения для облегчения вычислений газоразрядную лампу принято рассматривать, как протяжённый источник света с нулевой толщиной и равномерной светимостью. Проще говоря, лампу представляют в расчётах, как равномерно светящийся геометрический отрезок, концы которого совпадают с границами газового разряда, при этом расчёт облучённости в какой-либо точке пространства происходит по принципу суперпозиции полей от каждого небольшого кусочка этого светящегося отрезка. В 1955 году Кайтцем было предложено уравнение для расчёта светящей линии. Международной ультрафиолетовой ассоциацией IUVA [19] было утверждено использовать формулу Кайтца [20] для расчёта энергетического потока на заданном расстоянии от УФ лампы:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

где – энергетический поток излучения, – облучённость, – протяжённость источника света, – нормальное расстояние от точки наблюдения до источника, – угол, под которым видна лампа из точки наблюдения. Таким образом, зная расстояние до точки наблюдения, геометрические параметры лампы и её мощность в ультрафиолетовом диапазоне, можно рассчитать дозу, приходящую на единицу поверхности от этой лампы.

|  |
| --- |
| Рис. 2. Иллюстрация к формуле Кайтца из [19]. Красный квадрат – ультрафиолетовый радиометр, голубая линия – газоразрядная лампа длины L, находящаяся на расстоянии D от радиометра. |

В формуле (2) можно перейти к полной энергии, отданной лампой за время работы, , умножив левую и правую части на время обработки :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Таким образом, согласно руководству по использованию ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях [21], время обработки поверхностей помещения многоламповой установкой принято рассчитывать по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

где – суммарная энергия излучения от всех ламп установки, – наибольшее возможное расстояние от установки до границы помещения, – коэффициент использования бактерицидного потока, – КПД облучателя.

Целевой параметр в данном исследовании – коэффициент использования бактерицидного потока, зависящей от расстояния от точки наблюдения до облучателя по формуле (8), как отношение минимальной получаемой облучённости к максимальной теоретически возможной (в отсутствие какого-либо затенения) на одном и том же расстоянии от центра облучателя:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

Как видно из формулы (4), для расчёта времени обработки используются усреднённые данные о лампах и конструкции, а не минимальные значения облучённости среди всех точек обрабатываемой поверхности. В случае обработки воздуха можно считать, что он перемешивается, распределяя полученную дозу по всему объёму, но поверхности лишены возможности перераспределять дозу по доступному пространству. Поэтому распределение ультрафиолетового излучения бактерицидного диапазона в пространстве вокруг облучателя имеет важное значение для процесса обработки.

## Конструкция амальгамных газоразрядных ламп низкого давления

Для производства ультрафиолетовых ламп низкого давления используется кварцевое стекло. Этот материал обеспечивает наилучшее прохождение ультрафиолетового излучения из газового разряда во внешнюю среду, поглощая 10% излучения в случае толщины стенки равной 1мм. В колбе из кварцевого стекла находится смесь инертных газов, обычно неона и аргона. Также с внутренней стороны на кварцевом стекле находится золотое пятно с амальгамой. На концах лампы присутствует два электрода, после зажигания в лампе между электродами горит дуговой разряд в смеси паров ртути и инертных газов. Электроды помещены в кварцевую оболочку с сохранением герметичности, сверху на этом месте надеты керамические цоколи, предназначенные для удобного подключения лампы к источнику питания.

|  |
| --- |
| 5  4  3  2  1  Рис. 3. Основные части конструкции лампы. 1 – кварцевая колба, 2 – электрод, 3 – цоколь, 4 – золотое пятно, 5 – амальгама |

В горящей лампе, когда амальгама нагрета, присутствуют пары ртути, атомы которой способны излучать и поглощать фотоны в бактерицидном диапазоне. Поглощение излучения ртутью приводит к эффекту затенения [22], это играет роль, когда рассматривается распределение облучённости от нескольких работающих ламп. Помимо ламп, объектами, затеняющими часть излучения, являются и силовые элементы конструкции прибора. Так некоторые облучатели реализуют менее 50% своей мощности вследствие использования неудачных компоновок.

## Энергетическая эффективность

Как уже было сказано выше, настоящее время в промышленных установках и бытовых приборах УФИ, в большинстве случаев, получают из источников, в основе которых лежит разряд в парах ртути. В данной работе в качестве источника излучения будут использованы газоразрядные амальгамные лампы низкого давления. Согласно теоретическому расчёту [23], в подобных лампах около 50% электрической мощности, потребляемой разрядом, переходит в УФИ с длиной волны 253,7 нм. Практически достижимая эффективность амальгамных ламп низкого давления на сегодняшний день – 30-40% в зависимости от типа лампы. Эффект затенения газоразрядных ламп приводит к необходимости дополнительно учитывать неравномерность распределения УФ-излучения в пространстве и вводить коэффициент бактерицидного потока, равный 0.4, согласно руководству [21]. Умножив все эти два коэффициента друг на друга, получим, что в зависимости от конструкции и типа ламп облучатель использует от 15% до 28% потребляемой электрической мощности. И так как коэффициент использования бактерицидного потока является одним из двух компонент, входящих в определение общего КПД облучателя, его повышение существенно повлияет на КПД облучателя.

## Мировой опыт решения проблемы

В 2017 году в работе [24] была представлена модель для расчёта распределения УФ-излучения в системах ламп, однако в модели не были учтены конечные размеры лампы, как источника, что не позволяет моделировать полутени. В 2021 году было проведено исследование эмиссии фотонов в ртутном газовом разряде высокого давления [25], было проведено подробное моделирование процессов, протекающих в плазме, в том числе эмиссии фотонов, но задача поглощения газоразрядной лампой излучения от другой такой же лампы осталась не рассмотренной. В 2021 году группой исследователей из Сколково [26] в качестве решения проблемы неравномерного распределения облучённости УФ-излучения вокруг облучателей был представлен автономный робот, способный самостоятельно передвигаться и ориентироваться в пространстве благодаря машинному зрению. Авторы работы больше внимания уделили управлению машиной, логике передвижений и построению маршрутов, а результаты УФ-обработки были затронуты поверхностно. Затем в 2022 году было опубликовано исследование [27], в котором также было представлено решение проблемы неравномерного распределения УФ-излучения, основанное на применении роботизированных автономных облучателей. В данной работе было проведено подробное сравнение распределения облучения от стационарных и передвижных облучателей в конкретном помещении, в результатах которого можно видеть значительный положительный эффект от применения такого решения. Однако, роботизированные решения не лишены недостатков: они требуют определённой подготовки помещения перед обработкой, а также не могут использовать мощные амальгамные лампы низкого давления, так как они имеют высокое энергопотребление, кроме того, роботизированные решения пока не поставлены на потоковое производство. Фактически, это означает, что на сегодняшний день практическое применение имеет расчёт времени работы стационарных облучателей по формуле (4), в которой важную роль играет коэффициент использования бактерицидного потока.

Поэтому целью данной работы является разработка средств и методов расчёта полей распределения облучённости для ультрафиолетовых облучателей открытого типа для определения и повышения их коэффициента использования бактерицидного потока.

# Теоретическая часть

## Методы расчёта и контроля облучённости

Изучение распределения облучённости вокруг конкретного облучателя можно свести к измерению распределения облучённости в горизонтальной плоскости, проходящей через середины ламп. Такое упрощение уместно в связи с тем, что распределение облучённости одной лампы известно – оно представляет собой тороид, осью которого является сама лампа. Кроме того, большинство облучателей спроектированы таким образом, что лампы и конструктивные элементы расположены вертикально, параллельно друг другу. Такая конфигурация обеспечивает одинаковое распределение облучённости в любой горизонтальной плоскости, при условии нормировки на максимальное значение облучённости в каждой из них.

Как было сказано выше, пары ртути в газоразрядных лампах могут не только излучать, но и поглощать фотоны на длине волны 253,7 нм, что приводит к взаимному затенению. Существенный вклад взаимного затенения ламп был обнаружен нами в ходе проведения измерений облучённости в пространстве от конкретных образцов облучателей, присутствующих на рынке. Результаты измерений можно увидеть на рис. 4.

|  |
| --- |
| Рис. 4. Распределение облучённости от 8-ламповой установки на расстоянии 3 метра. Голубые круги – лампы, тёмно-серые круги – элементы конструкции, красные треугольники – особые локальные минимумы облучённости. |

На рисунке отмечены красными треугольниками особые минимумы облучённости, затенение в которых нельзя связать с тем, что какие-либо элементы конструкции закрывают одну или несколько ламп. Наблюдение такого неравномерного распределение подтолкнуло авторов работы исследовать зависимость распределение облучённости от компоновки облучателей, то есть, от формулы расположения ламп в нём. Для дальнейшего использования опыта, полученного в данном исследовании, было решено составить цифровую модель облучателя, которая будет способна рассчитывать распределение облучённости при заданных параметрах. Такое решение позволяет экономить время и ресурсы, необходимые для создания опытной модели облучателя для натурных исследований распределения облучённости.

## Модель лампы

В нашем случае и газоразрядные лампы, и непрозрачные элементы конструкции представляли из себя окружности, как и в большинстве облучателей, представленных на рынке. Окружности замещались пятью опорными точками, как показано на рисунке 5. Точка в центре является геометрическим центром окружности, а четыре других – края взаимноперпендикулярных диаметров лампы.

|  |
| --- |
| Рис. 5. Замещение окружности лампы пятью точками. A – геометрический центр лампы, A1 – A­­4 расположены на расстоянии, равном радиусу лампы. |

Каждая точка представляет собой источник излучения со своей мощностью, при этом суммарная мощность всех точечных источников одной лампы должна равняться мощности лампы, что является условием нормировки. Мощность излучения точек определялась в отдельном эксперименте, описание которого будет приведено ниже.

Также в модель лампы необходимо включить коэффициент поглощения, чтобы определить, какая доля излучения от одной ультрафиолетовой лампы проходит вторую лампу насквозь. Так как на коэффициент поглощения влияет очень большое количество факторов, расчёт которых не является целью данной работы, для определения поглощения лампы также был проведён отдельный эксперимент. Для непрозрачных элементов конструкции введён коэффициент пропускания, равный нулю.

Вводя такую модель лампы, в работе преследовалась цель не только учесть длину лампы, что реализует метод Кайтца, но и её радиус – именно этот параметр является ключевым в системе для расчёта распределения облучённости.

## Модель расчёта затенения

Заменив каждую лампу пятью опорными точками, мы облегчили задачу вычисления доли излучения, которое приходит от конкретной лампы в расчётную точку. На рисунке 6 приведён пример схемы установки, с заменой ламп на опорные точки.

|  |
| --- |
| Рис. 6. Пример схемы установки в горизонтальном сечении. |

Как видно из рисунка, излучение не от всех точек лампы 2 и лампы 3 беспрепятственно попадает в точку расчёта, в отличие от точек лампы 1. Путём последовательных упрощений можно свести задачу к перебору всех точек-источников излучения и всех отрезков, представляющих из себя светофильтры со своим коэффициентом пропускания. Таким образом, для определения облучённости в конкретной расчётной точке, необходимо вычислить следующую сумму:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |
|  | (7) |
|  | (8) |

Здесь – это коэффициент пропускания объекта: лампы или элемента конструкции, всего «фильтров» 2N штук, так как в каждом объекте находится по 2 таких фильтра – его диаметры. Мощность каждой точки лампы умножается на – совокупный коэффициент пропускания из системы фильтров, встретившихся на пути. Для демонстрации метода проверки наличия пересечения луча от m-й точки с f-ым фильтром последовательно упростим расчётную схему до четырёх точек рисунке 7 (а - б): излучатель (A), приёмник (B) и две крайние точки отрезка-фильтра (C и D), как показано рисунке 7 (б).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | | (а) | (б) |   Рис. 7 Упрощённая схема расчёта. А – точечный источник излучения, B – приёмник или точка выполнения расчёта, C и D – граничные точки отрезка-фильтра. |

Задача проверки на наличие точки пересечения отрезков AB и CD сводится к задаче определения, является ли четырёхугольник ACBD выпуклым: если да, тогда точка пересечения существует, если нет – такой точки нет. Классический способ проверки четырёхугольника опирается на свойство векторного произведения: результирующий вектор направлен перпендикулярно плоскости, образованной двумя исходными векторами, при этом направление результирующего вектора зависит от последовательности умножения исходных векторов. Условие проверки звучит следующим образом: если результаты векторных произведений и имеют разные знаки, а также результаты векторных произведений и имеют разные знаки, тогда AB и CD имеют пересечение в некоторой точке, что равносильно прохождению луча из точки A через фильтр CD.

Описанная выше расчётная модель лампы, как источника излучения с конечной геометрией и поглотителя излучения, а также облучателя в виде набора таких ламп и непрозрачных элементов конструкции, позволяет исследовать влияние конструктивных решений и компоновки оборудования на распределение излучения вокруг него, и как следствие, эффективность его работы.

# Практическая часть

# Определение коэффициента поглощения горящей газоразрядной лампы

Для определения коэффициента поглощения газоразрядной лампы был спроектирован специализированный стенд, фотографию которого можно видеть на рисунке 8:

|  |
| --- |
| 5  4  3  2  1  Рис. 8. Фотография экспериментального стенда для определения коэффициента пропускания горящей газоразрядной лампы низкого давления. 1 – металлический корпус, 2 – диафрагмы, предотвращающие отражение от стенок, 3 – коллимирующая диафрагма, 4 – газоразрядные амальгамные лампы низкого давления, 5 – радиометр ILT5000. |

Стенд состоит из металлического корпуса 1, в котором в вертикальных прорезях закрепляются пластины с прямоугольными отверстиями – диафрагмы. С одной стороны в вертикальной прорези фиксировался датчик-радиометр ILT5000 производства компании International Light Tech. Перед датчиком стоят 4 диафрагмы, не позволяющие ультрафиолетовому излучению приходить в датчик путём отражения от стенок стенда. Непосредственно перед ближайшей лампой расположена коллимирующая диафрагма с вырезом шириной 2 мм, находящимся строго напротив центра лампы. В стенде лампы и датчик закреплялись в специальных муфтах, обеспечивавших расположение входного окна радиометра в плоскости центральных осей ламп. Набор диафрагм позволяет зарегистрировать датчиком лишь ту часть излучения дальней лампы, которая проходит через центр ближней, и при этом отсечь все остальные варианты прохождения излучения через систему. Эксперимент проводился в три этапа, схемы которых представлены на рисунке 9:

|  |
| --- |
| Рис. 9. Этапы проведения эксперимента по определению коэффициента пропускания газоразрядной амальгамной лампы низкого давления. |

1. Измерение облучённости, создаваемой ближней лампой в отсутствие дальней.
2. Измерение облучённости, создаваемой дальней лампой в отсутствие ближней.
3. Измерение облучённости, создаваемой обеими лампами вместе, находящимися друг за другом.

Вычитая результаты первого этапа из результатов третьего, была получена доля излучения дальней лампы, проходящей ближнюю лампу насквозь. Для ламп, использовавшихся в данной работе, коэффициент поглощения горящей газоразрядной лампы составил 0.85±0.03.

## Определение мощности точечных источников излучения в модели лампы

Согласно разработанной модели лампы, необходимо определить, какая мощность у каждого точечного источника излучения, из набора, на который мы заменили лампу. Для определения этих параметров было решено провести исследования распределения мощности излучения в поперечном срезе лампы в направлении датчика. Схему эксперимента можно увидеть на рисунке 10:

|  |
| --- |
| Рис. 10. Схема эксперимента по исследованию распределения мощности излучения в поперечном срезе лампы в направлении датчика. |

В эксперименте использовался тот же стенд, что и в предыдущем исследовании, однако теперь вместо одной коллимирующей диафрагмы использовалась не одна пластина с вырезом, а набор из двадцати пяти пластин с двухмиллиметровыми вырезами на разной высоте. Перебирая диафрагмы из набора и устанавливая их в стенд, мы оставляли только ту часть излучения, которая исходит от конкретного слоя лампы в направлении датчика, на схеме эксперимента лампа нарисована разделённой на несколько таких слоёв для удобства восприятия. Всего таких слоёв двадцать пять – по количеству диафрагм. Как и в прошлый раз, в корпусе помимо основной диафрагмы установлены ещё дополнительные, предотвращающие возможность отражения излучения от стенок корпуса экспериментального стенда. В результате измерений была получена зависимость излучаемой мощности от высоты расположения щели коллимационной диафрагмы, представленная на рисунке 11:

|  |
| --- |
| Рис. 11. Результаты исследования распределения мощности, излучаемой в направлении датчика, в поперечном срезе лампы. За 0 по оси абсцисс взята высота, на которой расположена плоскость, содержащая ось лампы и центр входного отверстия датчика. |

Как видно из приведённого графика, центральная треть лампы производит 70% мощности, излучаемой в направлении датчика. Таким образом, на каждую точку периферии необходимо отдать по 15% мощности лампы, а центральной – оставшиеся 40%, чтобы распределение мощности от цифровой модели лампы наилучшим образом согласовывалось с таким распределением в реальном объекте.

## Исследование зависимости распределения излучения в пространстве вокруг открытых облучателей от их компоновки

Исследование влияния компоновки на распределение излучения в пространстве вокруг облучателя необходимо для проверки гипотезы о существенном влиянии затенения ламп и верификации расчётной модели. Для проведения исследования был спроектирован экспериментальный стенд, позволяющий моделировать излучатели с различным расположением ламп и элементов конструкции, его фотографию можно видеть на рисунке 12:

|  |
| --- |
| Рис. 12. Фотография стенда для исследования распределения излучения в пространстве вокруг облучателя. |

Стенд представляет из себя передвижную платформу, на которую сверху через опорный подшипник установлен металлический короб со всей необходимой для питания ламп электроникой и отверстиями для крепления непрозрачных элементов конструкции – вертикальных металлических трубок круглого сечения. Короб соединён с платформой через подшипник, что даёт ему возможность свободно вращаться вокруг оси центрального элемента конструкции, на котором закреплены лампы. Прямые лампы фиксировались в вертикальном положении посредством пружинных полуколец, соединённых через переходную пластину с центральной опорой. На расстоянии 3 метра от центра стенда на высоте, соответствующей середине межэлектродного отрезка лампы, располагался тот же радиометр, что и в предыдущих экспериментах, на статичной подставке. Поворачивая стенд вокруг своей оси на различные углы, и измеряя облучённость датчиком, реализовано исследование распределение излучения в конкретной компоновке облучателя. После проведения исследования изменялись точки расположения и количество ламп, и исследование повторялось.

В работу были взяты варианты с тремя, четырьмя, шестью и восьмью лампами, закреплёнными симметрично на одном расстоянии от центра стенда (радиус расположения), так как такие компоновки представляют большинство существующих варианты облучателей на рынке. На рисунках 13 (а-г) показаны примеры расположения ламп в конструкции. В компоновках с шестью и восемью лампами перемещались пары ламп, как это хорошо заметно на рисунке 13 (в).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | | (а) | (б) | | (в) | (г) |   Рис. 13. Примеры компоновок с различным количеством ламп. Голубые круги – лампы, тёмно-серые круги – непрозрачные элементы конструкции |

Радиус расположения ламп в облучателях варьировался в пределах от 65 мм, наименьшего геометрически возможного, до 185 мм – границы габаритных размеров облучателя. Также в каждой компоновке присутствовало по пять непрозрачных элементов конструкции: один в центре модели и четыре в углах на расстоянии 490 мм друг от друга. Исследовалось влияние радиуса расположения ламп в облучателе на распределение излучения вокруг него. Пример результатов экспериментального исследования распределения излучения вокруг шестиламповой компоновки обозначен на рисунке 13 сплошной линией. Кроме того, распределение облучённости вокруг модели облучателя рассчитывалось по модели, описанной в предыдущей главе данной работы. Результаты работы расчётной модели приведены на рисунке 14 пунктирной линией.

|  |
| --- |
| Рис. 14. Пример результатов исследования зависимости распределения излучения вокруг облучателя с шестиламповой компоновкой и радиусом расположения ламп  65 мм. |

Сравнивая графики, полученные в эксперименте и в расчёте по созданной в рамках данной работы модели, можно видеть, что характерные пики и минимумы облучённости в обоих случаях совпадают по расположению и абсолютному значению. Коэффициент корреляции теоретической и экспериментальной кривой составил 0.79±0.04.

Наиболее важные точки графика – минимумы, так как именно по ним рассчитывается время работы облучателя так, чтобы все поверхности помещения набрали необходимую дозу излучения, поэтому сравнение компоновок в рамках данной работы производилось по коэффициенту использования бактерицидного потока , который по своей сути является минимальному значению облучённости, достигаемой в конкретной компоновке, нормированному на константу, одинаковую для всех компоновок с одним и тем же количеством ламп (формула (5)). На рисунках 15 (а-г) представлены результаты измерений для всех типов компоновок, исследовавшихся в данной работе.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | | (а) | (б) | | (в) | (г) |   Рис. 15. Результаты исследования зависимости распределения ультрафиолетового излучения в пространстве вокруг облучателей с различным количеством ламп от радиуса расположения ламп. а – три лампы, б – четыре лампы, в – шесть ламп, г – восемь ламп. |

Как видно из графиков, зависимость k от радиуса расположения ламп совпадает для экспериментальных и расчётных данных, что свидетельствует о том, что разработанная в данной работе расчётная модель лампы и облучателя близки к реальности. Средний коэффициент корреляции данных на рисунках 15 (а-г) составил 0.82±0.06, что свидетельствует о надёжности метода компьютерного расчёта, представленного в данной работе.

# Заключение

Важным показателем правильности предположений, принятых в данной работе, являются высокие коэффициенты корреляции экспериментальных и расчётных данных для распределения излучения вокруг облучателя, равный 0.79±0.04, а также для зависимости коэффициента использования бактерицидного потока от радиуса расположения ламп в системе 0.82±0.06. Иными словами, расчётную модель можно использовать для проектирования оборудования с целью экономии времени и средств на его производство, и получать достоверные результаты о распределении излучения в пространстве.

Результаты исследования распределения излучения вокруг различных типов облучателей показали, что стандартизированный коэффициент использования бактерицидного потока, рекомендованный руководством [21] может существенно отличаться от фактически полученного при измерении. Например, компоновки с четырьмя и восемью лампами показали коэффициент использования бактерицидного потока на 15-20% превышающий рекомендованный. Это означает, что на 15-20% можно сокращать время обработки помещений такими облучателями даже без попыток усовершенствовать конструкцию путём поиска оптимальных положений ламп. Несмотря на рекомендательный характер предложения для каждого отдельного облучателя измерять коэффициент использования бактерицидного потока в руководстве [21], мы считаем это необходимостью для обоснования технических параметров, указанных в паспорте устройства.

# Список литературы

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | Bosco R., Cevenini G., Gambelli S., Nante N., Messina G., «Improvement and stadartization of disinfection in hospital theatre with ultraviolet-C technology,» 2022. |
| [2] | Messina G., Camera A.D., Ferraro P., Amodeo D., Corazza A., Nante N., Cevenini G., «An Emerging Innovative UV Disinfection Technology (Part II): Virucide Activity on SARS-CoV-2,» 2021. |
| [3] | Messina G., Amodeo D., Taddeini F., De Palma I., Cevenini G., «Wind of change: Better air for microbial environmental control,» 2022. |
| [4] | Welch D., Buonanno M., Grilj V., Shuryak I., Crickmore C., Bigelow A.W., Randers-Pehrson G., Johnson G.W., Brenner D.J., «Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases,» *Scientific Reports,* 2018. |
| [5] | Hamzavi I.H., Lyons B.A., Kohi I., Gelfand M.J., Lim H.W., Ozog D.M., "Ultraviolet germicidal irradiation: Possible method for respirator disinfection to facilitate reuse during the COVID-19 pandemic," *Journal of the American Academy of Dermatology,* 2020. |
| [6] | Anderson M.,, «The ultraviolet offense: Germicidal UV lamps destroy vicious viruses. New tech might put them many more places without harming humans,» 2020. |
| [7] | Ненахова Е.В., Николаева Л.А., Ультрафиолетовое излучение. Влияние ультрафиолетового излучения на организм человека, 2020, pp. 17-29. |
| [8] | ГОСТ IEC 60730-1, Москва, 2016. |
| [9] | Downes A., Blunt T., «The influence of light upon the developement of bacteria,» *The Nature,* 1877. |
| [10] | Beukers R., Berends W., «The effects of u.v.-irradiation on nucleic acids and their components,» *Biochimica et Biophysica Acta,* 1961. |
| [11] | Костюченко С.В.,Ткачев А.А.,Фроликова T.Н., «УФ-технологии для обеззараживания воды, воздуха и поверхностей: принципы и возможности.,» *Эпидемиология и Вакцинопрофилактика.,* 2020. |
| [12] | Bolton J.R., Cotton C.A., The ultraviolet disinfection handbook. American Water Works Association, 2011. |
| [13] | Beck S.E., Hull N.M., Poepping C., Linden K.G., «Wavelength-Dependent Damage to Adenoviral Proteins Across the Germicidal UV Spectrum,» 2017. |
| [14] | Seter A., Sanlidag T., «Solar ultraviolet radiation sensitivity of SARS-CoV-2,» *The Lancet,* 2020. |
| [15] | 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. |
| [16] | Собур Д.А., «Амальгамная лампа для генерации вакуумного ультрафиолетового излучения (185 нм),» 2017. |
| [17] | Лаврентьева Л.В., Авдеев С.М., Сосин Э.А., Величевская К.Ю., «Бактерицидное действие ультрафиолетового излучения эксимерных и эксиплексных ламп на чистые культуры микроорганищмов,» 2008. |
| [18] | Юрьев Ю.В., Световые волны и фотоны, 2010. |
| [19] | Contributing authors on the IUVA Manufacturers’ Council, «Method for the Measurement of the output of Monochromatic (254 nm) Low Pressure UV Lamps,» 2017. |
| [20] | Прытков С.В., Капитонов С.С., Винокуров А.С., «Уточнение метода определения потока излучения линейных разрядных УФ-ламп низкого давления,» 2021. |
| [21] | 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., Руководство Р 3.5.109-04, 2004. |
| [22] | Бахирев Н.Е., «Коррекция фона атомно-абсорбционного анализатора ртути,» 2023. |
| [23] | Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Храменков С.В., Ультрафиолетовые технологии в современном мире, 2012. |
| [24] | P. C. Hoi, Validation of discrete ordinate radiation model for application in UV air disinfection modeling, Lakehead University Library, 2014. |
| [25] | O. Vigstrand, «Development of an absorption model for gas discharge lamp simulation,» *Malmö University, Faculty of Technology and Society,* 2021. |
| [26] | S. Perminov et al., «UltraBot: Autonomous Mobile Robot for Indoor UV-C Disinfection,» *IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE),* pp. 2147-2152, 2021. |
| [27] | Haag C.W., Holliday G., Archulet K., Tang W., «Comparing UV-C dosages of emmiter placement strategies in a community hospital setting,» 2022. |