

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 с применением ультрафиолетового излучения [1]. За последние несколько лет изделия для обеззараживания воздуха и поверхностей в воздушной среде, то есть облучатели открытого типа, получили сильное распространение [2]: они широко начали использоваться образовательными учреждениями, заведениями общественного питания и транспортными компаниями. Основными требованиями к оборудованию открытого типа являются:

- 1) Скорость обработки – помещение можно обрабатывать только в отсутствие людей [3]. То есть, операционная, учебный кабинет или автобус не сможет выполнять свои прямые задачи в течение времени обработки. Для повышения скорости обработки, компании разрабатывают оборудование со всё более и более высоким уровнем мощности.
- 2) Энергетическая эффективность – это требование продиктовано не только простыми экономическими соображениями, но и техническими возможностями электрических сетей. Повышение потребляемой мощности означает повышение тока в сети, что налагает ограничение на её использование, так как электрическая автоматика [4] способна пропускать через себя ограниченное количество тока.

Производители средств обработки поверхностей и воздуха ультрафиолетовым в конкурентной борьбе пытаются как можно лучше реализовать оба запроса. Одной из современных технологий, способной помочь в решении данных задач является компьютерное и математическое моделирование. С помощью данного инструмента можно более детально определить характеристики проектируемого оборудования с помощью численных и аналитических методов расчёта.

Бактерицидное действие ультрафиолетового излучения

Ультрафиолетовое излучение (УФИ) – это часть спектра электромагнитного излучения, длина волны которой лежит в диапазоне 10 - 400 нм. Этот диапазон принято разделять на 4 участка: А – 400-315 нм, В – 315-280 нм, С – 280-200 нм. Бактерицидные свойства УФИ были впервые обнаружены в 1876 году А. Даунсом и Т. Блантом [5]. В 1961 году Р. Бекерс и У. Берендс [6] обнаружили реакцию ультрафиолета непосредственно с тиминном – одним из пяти азотистых оснований, составляющих ДНК; это открытие объяснило бактерицидную эффективность С-диапазона УФИ. То есть, при прохождении через микроорганизмы фотоны, переносящие энергию на длине волны

ультрафиолетового диапазона, взаимодействуют с различными компонентами клетки, в частности, с нитями ДНК и РНК, что приводит к их повреждениям и, следовательно, к деактивации механизмов размножения [7] микроорганизмов. Этот эффект ультрафиолетового излучения называют бактерицидным. Для разных микроорганизмов, в силу их биологических и химических [8] особенностей, восприимчивость к излучению различных длин волн будет разной, поэтому эмпирическим путём была установлена оптимальная длина волны, обеспечивающая примерно равную бактерицидную эффективность для большинства опасных микроорганизмов. Эта оптимальная длина волны, равная 265 нм, называется волной максимума бактерицидной чувствительности [9]. Другие длины волн УФ диапазона тоже имеют бактерицидный эффект, однако, у некоторых микроорганизмов восприимчивость к излучению с такой длиной волны будет отсутствовать. В обзорной статье по эксимерным лампам [10] приведён график спектральной чувствительности для *E. coli*, и ДНК, а также атомарная линия ртути (Рис. 1):

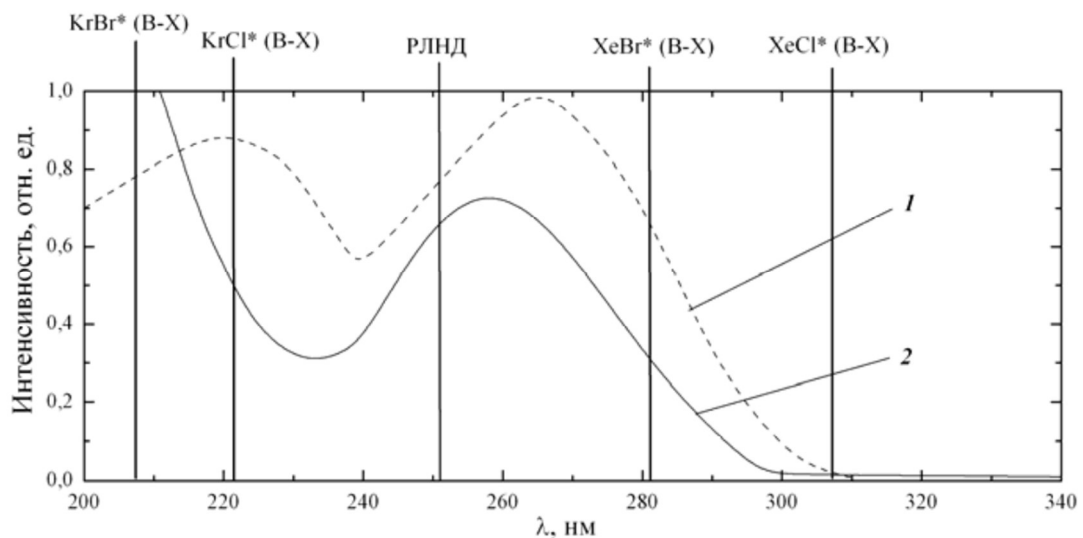


Рис. 1. Спектральная чувствительность ДНК к УФ-излучению

1 – Спектр инактивирующего действия УФ-излучения на *E. coli*, 2 – интегральный спектр поглощения ДНК.

Поэтому рабочей длиной волны основной и самой важной характеристикой для обработки поверхности является доза, получаемая единицей площади:

$$D = I \cdot t, \quad (1)$$

где D [Дж/м²] – полученная доза, I [Вт/м²] – интенсивность излучения на бактерицидной длине волны в точке наблюдения, t [с] – время облучения. Интенсивность точечного источника, в свою очередь, определяется [11] формулой:

$$I = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{dP}{dS} dt, \quad (2)$$

где T – период волны, dP – мощность, проходящая через площадь dS . В случае точечного источника, излучаемая мощность константна, а рассматриваемая площадь, по мере отдаления от источника, увеличивается квадратично, так что, интенсивность точечного источника убывает пропорционально квадрату расстояния от него.

Традиционные методы вычисления интенсивности лампы

В расчётах интенсивности 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 интенсивности 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 [12] было утверждено использовать формулу Кайтца [13] для расчёта энергетического потока на заданном расстоянии от УФ лампы:

$$\Phi = \frac{2E\pi^2LD}{2\alpha + \sin 2\alpha'} \quad (3)$$

где $\Phi[\text{Вт}]$ – энергетический поток или поток излучения, $E[\text{Вт}/\text{м}^2]$ – 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. 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:

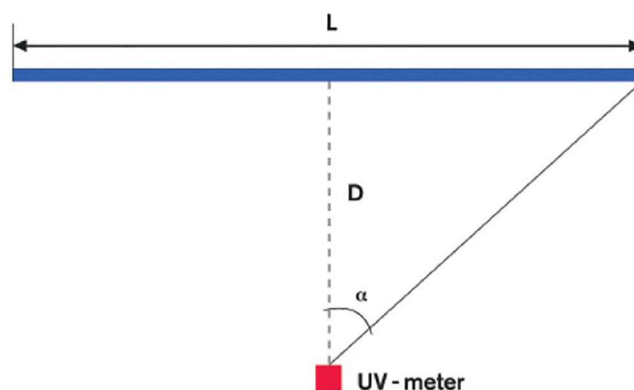


Рис. 2. Иллюстрация к формуле Кайтца

Предлагается авторами [12] в своей работе

В формуле (3) можно перейти к полной энергии, отданной лампой за время работы, W [Дж], умножив левую и правую части на время обработки t :

$$W = \frac{2Et\pi^2 LR}{2\alpha + \sin 2\alpha}. \quad (4)$$

Таким образом, согласно ГОСТу, время обработки поверхностей помещения многоламповой установкой принято рассчитывать [14] по формуле:

$$t = \frac{W_{\Sigma}(2\alpha + \sin 2\alpha)}{2K_{\phi}\eta E\pi^2 LR_{max}}, \quad (5)$$

где W_{Σ} [Вт] – суммарная энергия излучения от всех ламп установки, R_{max} [м] – наибольшее возможное расстояние от установки до границы помещения, K_{ϕ} – коэффициент использования потока помещением, η – КПД облучателя.

Как видно из формулы (5), 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. Так что, без достоверной информации о распределении облучённости минимальная доза, используемая в расчёте времени обработки, завышается, что приводит к недополучению расчётной дозы некоторыми областями обрабатываемой поверхности.

Конструкция амальгамных газоразрядных ламп низкого давления

Газоразрядная лампа состоит из оболочки из кварцевого стекла. Этот материал обеспечивает наилучшее прохождение ультрафиолета из газового разряда во внешнюю среду. В «капсуле» из кварцевого стекла находится смесь инертных газов, обычно неона и аргона. Также с внутренней стороны на кварцевом стекле находится золотое пятно с амальгамой, состав которой – ноу-хау каждой компании-производителя. На концах лампы присутствует два электрода, после зажигания в лампе между электродами горит дуговой разряд в смеси паров ртути и инертных газов. Электроды запаяны в кварцевую оболочку, сверху на этом месте надет керамический цоколь.

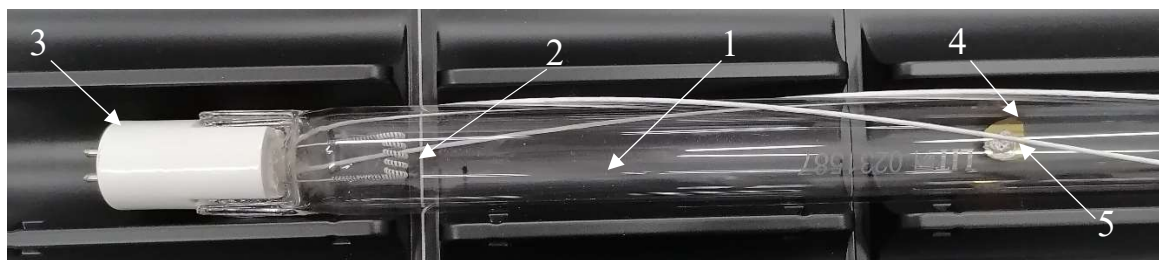


Рис. 3. Основные части конструкции лампы.

1 – кварцевая оболочка, 2 – электрод, 3 – цоколь, 4 – золотое пятно, 5 – амальгама

В горячей лампе, когда амальгама нагрета, присутствуют пары ртути, за счёт которых происходит излучение в бактерицидном диапазоне. Атомы ртути могут как излучать, так и поглощать фотоны на резонансной частоте, что приводит к эффекту затенения [15], когда рассматривается распределение интенсивности излучения от нескольких светящихся ламп. Кроме того, кварцевое стекло хоть имеет и очень низкий коэффициент поглощения УФИ, всё же пропускает не весь поток, поэтому кварцевая колба тоже производит вклад в эффект затенения. Помимо ламп, объектами, затеняющими часть излучения, могут быть и элементы конструкции прибора, особенно из шлифованного металла, так как он хорошо поглощает УФИ. Таким образом, как показали измерения, можно потерять до 50% номинального излучения на отдельных направлениях.

Энергетическая эффективность

В 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 амальгамные лампы низкого давления. Согласно теоретическому расчёту [16], в подобных лампах 30-50% электрической мощности, потребляемой разрядом, переходит в УФИ с длиной волны 253,7 нм. Практически достижимая эффективность амальгамных ламп низкого давления на сегодняшний день – 25-42% в зависимости от типа лампы. Общие усреднённые коэффициенты в данном случае неприменимы, так как физической основы для усреднения параметров нет. В 2022 году были опубликованы экспериментальные идеи в сфере усреднения пространства – движущийся источник излучения [17]. Однако, устройства, способные передвигаться самостоятельно на сегодня требуют существенных доработок помещений и разработки отдельных требований к размещению мебели и других предметов интерьера. Фактически, это означает, что для расчётов времени обработки по формуле (5), необходимо ориентироваться на минимальные значения облучённости поверхности, ведь находящиеся в таких зонах микроорганизмы не дозы, достаточной для гарантированной инактивации.

Поэтому целью данной работы является разработка средств и методов расчёта энергетической эффективности с применением численных расчётов.

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] 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.
- [3] Ненахова Е.В., Николаева Л.А., Ультрафиолетовое излучение. Влияние ультрафиолетового излучения на организм человека, 2020, pp. 17-29.
- [4] ГОСТ IEC 60730-1, Москва, 2016.
- [5] Downes A., Blunt T., «The influence of light upon the developement of bacteria,» *The Nature*, 1877.
- [6] Beukers R., Berends W., «The effects of u.v.-irradiation on nucleic acids and their components,» *Biochimica et Biophysica Acta*, 1961.
- [7] Костюченко С.В., Ткачев А.А., Фроликова Т.Н., «УФ-технологии для обеззараживания воды, воздуха и поверхностей: принципы и возможности,» *Эпидемиология и Вакцинопрофилактика.*, 2020.
- [8] Bolton J.R., Cotton C.A., The ultraviolet disinfection handbook. American Water Works Association, 2011.
- [9] 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.
- [10] Лаврентьева Л.В., Авдеев С.М., Сосин Э.А., Величевская К.Ю., «Бактерицидное действие ультрафиолетового излучения эксимерных и эксиплексных ламп на чистые культуры микроорганизмов,» 2008.
- [11] Юрьев Ю.В., Световые волны и фотоны, 2010.
- [12] Contributing authors on the IUVA Manufacturers' Council, «Method for the Measurement of the output of Monochromatic (254 nm) Low Pressure UV Lamps,» 2017.

- [13] Прытков С.В., Капитонов С.С., Винокуров А.С., «Уточнение метода определения потока излучения линейных разрядных УФ-ламп низкого давления,» 2021.
- [14] 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.
- [15] Бахирев Н.Е., «Коррекция фона атомно-абсорбционного анализатора ртути,» 2023.
- [16] Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Храменков С.В., Ультрафиолетовые технологии в современном мире, 2012.
- [17] Haag C.W., Holliday G., Archulet K., Tang W., «Comparing UV-C dosages of emitter placement strategies in a community hospital setting,» 2022.