

## **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. Эффективность работы оборудования для ультрафиолетовой дезинфекции оценивается по количеству затраченной энергии, необходимой для того, чтобы бактерии получили определенный уровень повреждений, чтобы стать безопасными или погибнуть. (\*ссылка на какой-нибудь источник, где был рассмотрен бактерицидный эффект УФ\*). Степень обеззараживания определяется дозой, полученной единицей обрабатываемой поверхности за время обработки, которая, в свою очередь, пропорциональна интенсивности излучения. Благодаря наличию конструктивных особенностей излучателя, интенсивность излучения может распределяться по поверхностям неравномерно: например, в некоторых точках пространства вертикальные силовые элементы могут частично или полностью скрывать часть ламп, иначе говоря, происходит затенение ламп. Несмотря на это, в общей практике для упрощения расчётов времени облучения считают, что излучение происходит с одинаковой интенсивностью по всем направлениям, и мощность умножают на поправочный коэффициент 0.4, согласно 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. Затенение, в свою очередь, приводит к тому, что отдельные поверхности не получают заданную дозу, а это значит, что микроорганизмы, находящиеся на них, могут не получить достаточное количество повреждений. Поэтому при вычислении времени обработки необходимо брать в расчёт области с минимальной получаемой дозой. Иными словами, существует проблема неравномерного распределения светового потока от излучателей. Решить её возможно с помощью выбора компоновки излучателя, опираясь на распределение светового потока от ламп. Сэкономить время и ресурсы на разработку решения для компоновки излучателя 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. Под этим определением стоит понимать, что вопреки общей практике представления лампы в виде «тонкого светящегося отрезка», будет учитываться диаметр 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 окружностей, как и силовые элементы, в случае с используемой в нашем опыте установкой. Окружности упрощены до пяти точек с целью ограничения количества объектов, участвующих в расчётах. Этими пятью точками являются центр окружности и концы двух перпендикулярных диаметров, каждый из которых параллелен своей оси координат. Такая модель была выбрана как компромисс между потребностью в представлении ненулевой геометрии лампы, ограничением по вычислительной мощности, и удобством представления.

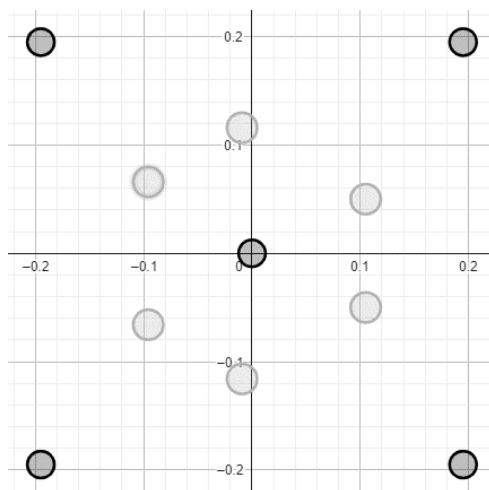


рис. 1

Представление излучателя в сечении горизонтальной плоскостью.  
Тёмные окружности – элементы конструкции, светлые окружности – лампы.

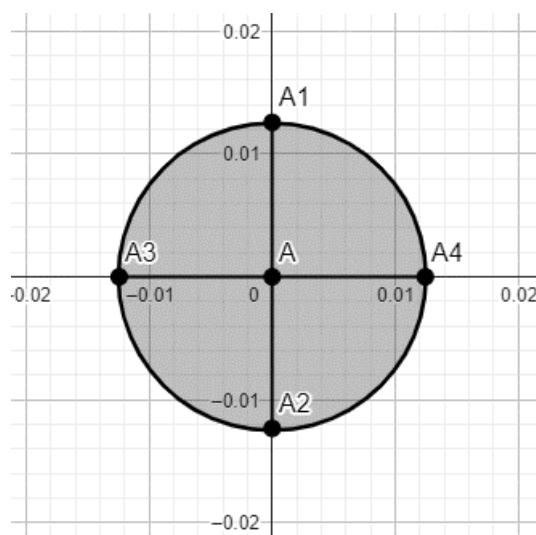


рис. 2

Преобразование окружностей в набор 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 будет перебрать все объекты системы и рассчитать, какие из ламп закрыты другими объектами и уменьшают вклад в дозу, полученную этой точкой пространства. То есть, будет реализован двойной полный перебор всех объектов системы для каждой из точек той части пространства, для которой проводится расчёт.

С помощью данной модели можно рассчитать, какие лампы создают вклад в дозу излучения в конкретной точке пространства. Таким способом можно смоделировать систему с вертикальным расположением ламп и силовых элементов конструкции, используя всего по 5 точек на каждый элемент, что сильно упрощает дальнейшие расчёты.

## Расчёт затенения

В качестве модельного объекта был выбран типовой образец напольного излучателя, 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 излучателя. 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.

Для получения более точной расчётной модели отдельно был проведён опыт по проверке плазмы в лампе на прозрачность для света от другой такой же лампы. Этот опыт позволил узнать, какое количество света от одной лампы может пройти сквозь другую такую же лампу. Для проведения эксперимента использовалась труба квадратного сечения с двумя газоразрядными лампами, которые включались поочерёдно, а затем одновременно. Это позволяло свету от одной лампы попасть в радиометр только после прохождения через вторую лампу. В результате эксперимента было установлено, что одна горящая лампа пропускает через себя около 10% света от соседней лампы. Эта информация была учтена в модели лампы. 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  $\vec{AB}$  и  $\vec{CD}$  имеют пересечение в некоторой точке.

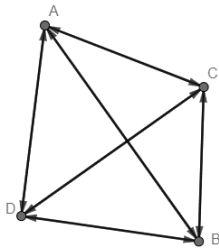


рис. 3

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

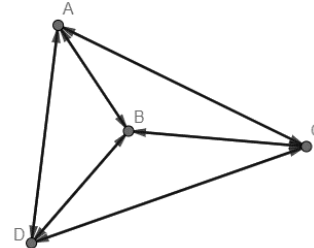


рис. 4

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, то есть стенд-излучатель, 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. Кронштейны представляют собой «звёзды» с тремя или четырьмя лучами, в каждом луче есть ряд отверстий с шагом 1 см, в которых фиксируются полукольца. Таким образом можно собирать различные конфигурации источников света. Лампы, закреплённые в

полукольцах, расположены вертикально, так что, они остаются параллельными друг другу. В нашем случае использовались лампы марки ЛIT ДБ300-Н4, мощностью 105 Ватт на длине волны 254нм. Лампы имеют диаметр 28мм, а все силовые элементы – 25мм. На расстоянии 3 метра от центральной опоры на высоте, середины лампы располагается радиометр 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 излучателя. То есть, строить индикатрису облучённости, создаваемую облучателем. Расстояние в 3 метра было определено как оптимальное для проведения измерений радиометром, поскольку наибольшие значения, полученные на этом расстоянии, наиболее близки к предельным измеримым для датчика.

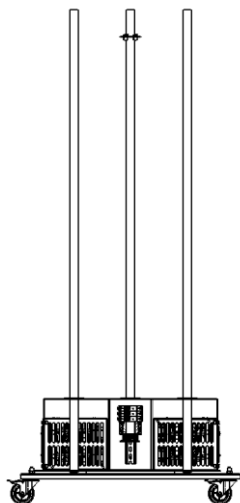


рис. 5

Стенд-излучатель, вид сбоку

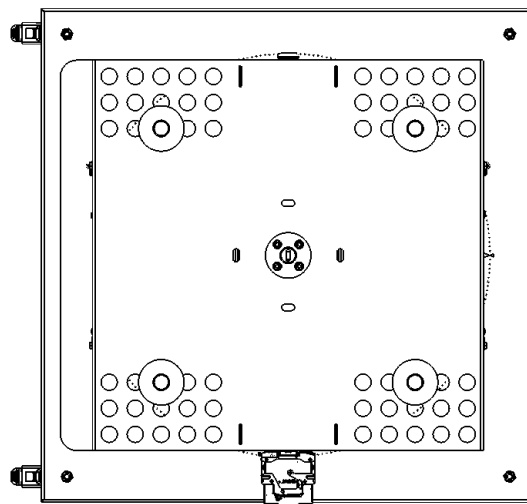


рис. 6

Стенд-излучатель, 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.

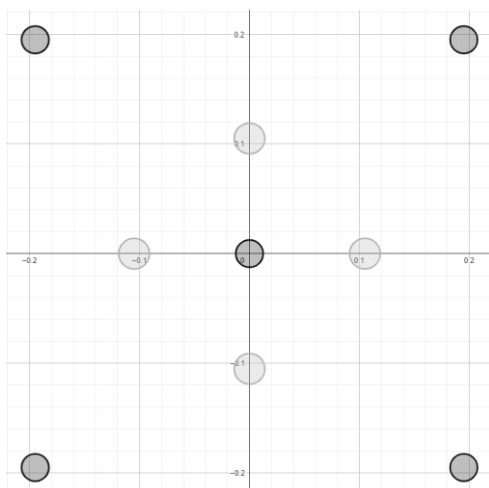


рис. 7

Пример компоновки четырёхламповой системы.

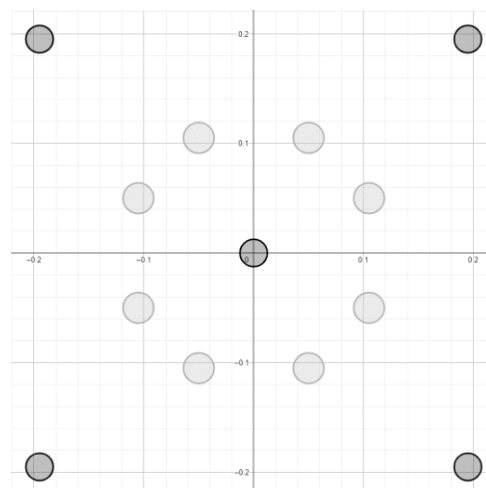


рис. 8

Пример компоновки восьмиламповой системы.

Измерения интенсивности для каждой компоновки проводились в 284 различных точках, распределённых по всей окружности равномерно и для 6-8 различных расстояний от центра установки. Целью испытания является нахождение такого радиуса расположения ламп для каждой компоновки, при котором минимальная интенсивность будет наибольшей. 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  $dr$ .

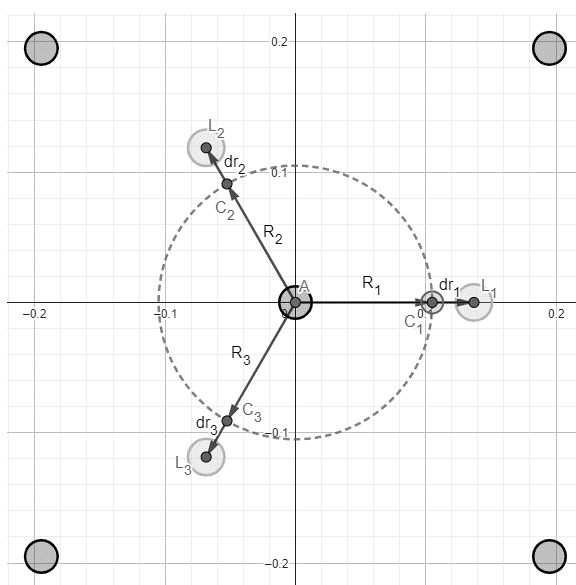


рис. 9

Пояснительный рисунок к введённой системе параметров.

## Результаты эксперимента

На рис. 10 изображен пример индикатрисы для трехлампового источника света, нормализованной на значение, рассчитанное с помощью метода, описанного в документе Р 3.5.1904-04, без учета корректирующего коэффициента. Для каждой системы ламп это значение своё, в дальнейшем будем называть его «референсным» (ref). В остальных случаях были оставлены только минимальные (min) и максимальные (max) значения, так как только они представляют практический интерес. Величину равную  $\frac{\min}{\text{ref}}$  будем называть степенью освещённости, а  $1 - \frac{\min}{\text{ref}}$  – степенью затенённости.

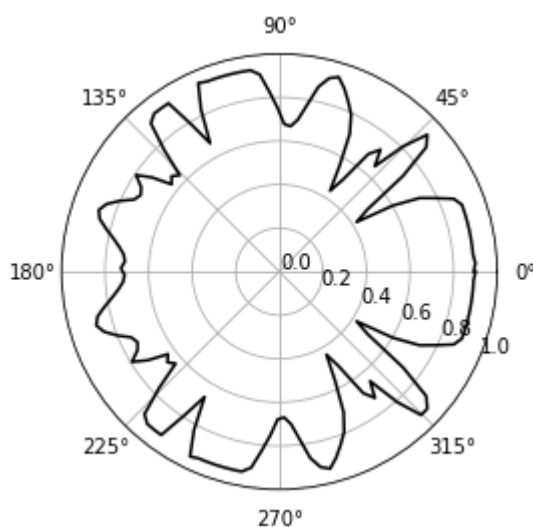


рис. 10

Экспериментально измеренная индикатриса трёхламповой системы.

Поведение индикатрисы подтверждает предположение о взаимном затенении ламп: есть минимумы в точках, которые нельзя объяснить расположением силовых элементов конструкции.

Ниже представлена таблица с данными, полученными в ходе измерений для компоновки с тремя лампами (рис. 9), а также в результате расчёта с использованием разработанной утилиты.

dr [см]	Минимум [Вт/м²]		Максимум [Вт/м²]	
	Опыт	Расчёт	Опыт	расчёт
-4	0.46	0.53	1.07	1.21
-2	0.48	0.49	1.09	1.21
0	0.49	0.51	1.09	1.21
2	0.53	0.5	1.08	1.21
4	0.43	0.46	1.03	1.21
8	0.67	0.79	1.07	1.21

Таблица 1

Сравнение результатов экспериментальных измерений и компьютерного моделирования для трёхламповой компоновки.

Нормированные на референсное значение 1.21 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.

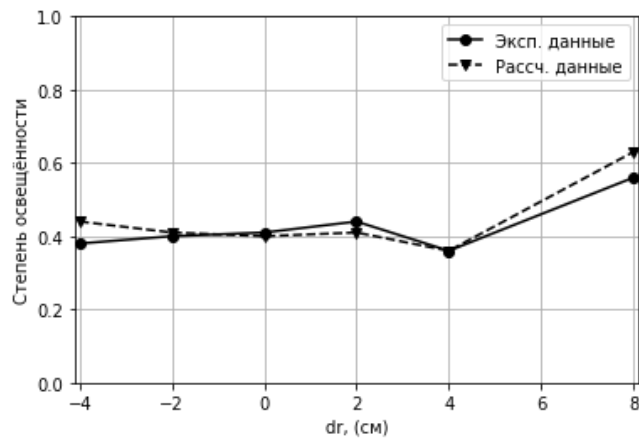


рис. 11

Таблица 1 в графическом представлении.

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

Результаты измерений и моделирования для компоновки с четырьмя лампами (рис. 7).

dr [см]	Минимум [Вт/м <sup>2</sup> ]		Максимум [Вт/м <sup>2</sup> ]	
	Опыт	Расчёт	Опыт	Расчёт
-4	0.71	0.88	1.34	1.61
-2	0.78	1.03	1.32	1.61
0	0.77	1.04	1.32	1.61
2	0.83	1.07	1.32	1.61
4	0.85	1.07	1.31	1.61
6	0.91	1.09	1.32	1.61
8	0.79	1.01	1.35	1.61

Таблица 2

Сравнение результатов экспериментальных измерений и компьютерного моделирования для четырёхламповой компоновки.

Нормированные на референсное значение 1.61 результаты измерений и компьютерного моделирования представлены на рис. 12.

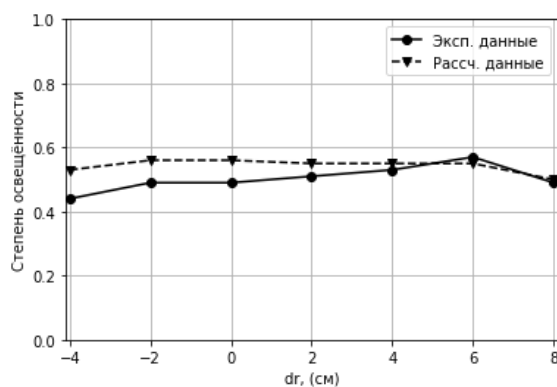


рис. 12

Таблица 2 в графическом представлении.

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

Результаты измерений и моделирования для компоновки с шестью лампами (рис. 1).

dr [см]	Минимум [Вт/м <sup>2</sup> ]		Максимум [Вт/м <sup>2</sup> ]	
	Опыт	Расчёт	Опыт	Расчёт
-4	0.92	0.98	2.04	2.36
-2	0.95	1	2.06	2.42
0	0.93	1.01	2.05	2.42
2	1.16	1.3	2.09	2.42
4	1.02	1.25	2	2.42
8	0.16	1.47	2.01	2.42

Таблица 3

Сравнение результатов экспериментальных измерений и компьютерного моделирования для шестиламповой компоновки.

Нормированные на референсное значение 2.41 результаты измерений и компьютерного моделирования представлены на рис. 13.

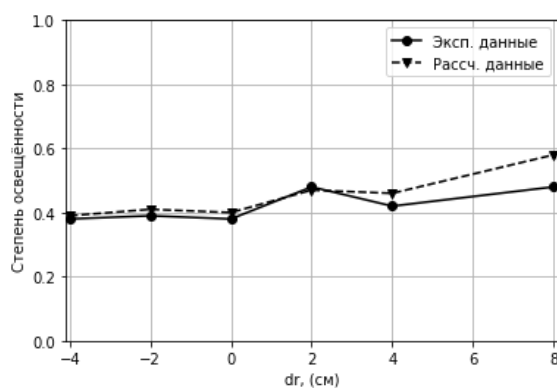


рис. 13

Таблица 3 в графическом представлении

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).

dr [см]	Минимум [Вт/м <sup>2</sup> ]		Максимум [Вт/м <sup>2</sup> ]	
	Опыт	Расчёт	Опыт	Расчёт
-2	0.78	1.92	1.32	2.93
0	0.77	1.96	1.32	3.12
2	0.83	1.95	1.32	3.14
4	0.85	1.99	1.31	3.17
6	0.91	2	1.32	3.14

Таблица 4

Сравнение результатов экспериментальных измерений и компьютерного моделирования для восьмиламповой компоновки.

Нормированные на референсное значение 3.27 результаты измерений и компьютерного моделирования представлены на рис. 14.



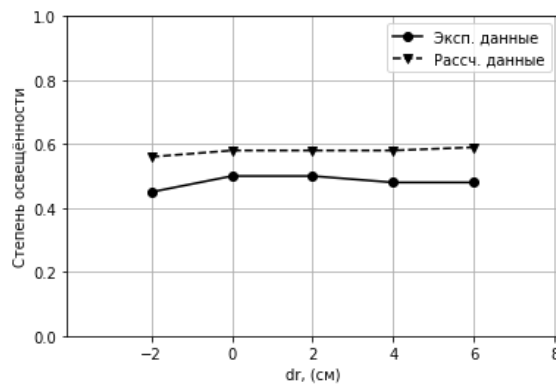


рис. 14

Таблица 4 в графическом представлении

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 степени затенённости.

Наиболее важный вывод, который можно сделать из полученных данных – для повышения энергоэффективности излучателей, состоящих из системы ламп, необходимо исследовать компоновку на оптимальное расположение источников света. Если посмотреть на график зависимости минимальной интенсивности от  $dr$  для шестилампной 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 позитивно отразится и на энергопотреблении, и на ресурсе ламп.

Кроме того, есть заметная тенденция к увеличению степени затенённости с увеличением количества ламп. То есть, в излучателях подобной конструкции лучше по возможности уменьшать количество ламп, так как таким образом можно уменьшить количество затеняющих объектов.

## Литература

Напишу попозже