

Бактерицидная эффективность излучения светодиода с длиной волны 272 нм в отношении госпитального штамма *Klebsiella pneumoniae*

А.С. Камруков¹ ✉, Т.В. Черненькая², Л.Ю. Володин¹, С.С. Петриков², К.А. Попугаев², В.В. Багров¹, И.В. Бухтияров³, Е.В. Зибарев³, К.А. Семенов¹, В.И. Крылов¹

Отдел НИИ энергетического машиностроения

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н.В. Склифосовского ДЗМ»

Российская Федерация, 129090, Москва, Б. Сухаревская площадь, д. 3

³ ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда им. акад. Н.Ф. Измерова»

Российская Федерация, 105275, Москва, пр-т Буденного, д. 31

✉ Контактная информация: Камруков Александр Семенович, заведующий отделом НИИ энергетического машиностроения. ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». Email: kamrukov@mail.ru

АКТУАЛЬНОСТЬ

В настоящее время применение ультрафиолетового (УФ) излучения для дезинфекции объектов и терапии инфекционных заболеваний рассматривается как перспективная альтернатива химическим биоцидным средствам и антибиотикам. Коротковолновые светоизлучающие диоды в спектральном диапазоне 200–280 нм и 280–315 нм являются сравнительно новым типом источников УФ излучения и потенциально способны удовлетворить требованиям актуальных медицинских технологий. Однако их возможности для лечения ран и инфекционных заболеваний на сегодняшний день практически не исследованы, что определяет актуальность экспериментов, направленных на изучение биоцидных и терапевтических свойств коротковолновых УФ светодиодов.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценить бактерицидную эффективность излучения светодиода с длиной волны 272 нм (272 нм светодиод) в отношении госпитальных штаммов бактерий *Klebsiella pneumoniae*, характеризующихся множественной лекарственной устойчивостью.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования выполнены с использованием экспериментального образца светодиодного аппарата УФ облучения с максимумом излучения при длине волны 272 нм и суммарной электрической мощностью 10 Вт. Доза УФ излучения (энергетическая экспозиция), достигаемая за один сеанс облучения (12 секунд) на расстоянии 10 см от облучателя, составляла 8 мДж/см². В экспериментах использовали госпитальный штамм бактерии *Klebsiella pneumoniae*, выделенный из крови больного. Штамм характеризовался множественной лекарственной устойчивостью. Суспензию суточной культуры *K. pneumoniae* с концентрацией 10⁸ КОЕ/мл в объеме 100 мкл переносили в чашку Петри диаметром 9 см с мясопептонным агаром и равномерно распределяли по поверхности диаметром 8 см. Чашки Петри облучали с расстояния 10 см от облучателя. Изменение дозы УФ облучения от 4 до 80 мДж/см² осуществляли варьированием продолжительности облучения. После облучения экспериментальные и контрольные (без облучения) чашки Петри помещали в термостат при 37°C на 24 часа, а затем проводили подсчет выросших колоний. Всего проведено 60 экспериментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате исследований показано, что светодиодный аппарат на основе пяти 272 нм светодиодов обеспечивает глубокое и оперативное обеззараживание поверхности от госпитальных штаммов бактерий *K. pneumoniae*, характеризующихся множественной лекарственной устойчивостью. Доза УФ излучения, равная 8 мДж/см², снижает контаминацию поверхности бактериями *K. pneumoniae* более чем в миллион раз (эффективность обеззараживания более 99,9999%). При дозах менее 10 мДж/см² эффективность 272 нм светодиодного аппарата в отношении инактивации бактерий *K. pneumoniae* на 3–4 порядка выше бактерицидной эффективности ртутных ламп.

ВЫВОД

Показана перспективность применения ультрафиолетовых аппаратов на основе светодиодов с максимумом излучения на длине волны 272 нм в системах оперативного обеззараживания массивно контаминированных поверхностей, потенциально включая и раневые поверхности.

Ключевые слова:

ультрафиолетовый светодиод, бактерицидная эффективность, контаминация поверхности, госпитальный штамм *Klebsiella pneumoniae*

Ссылка для цитирования

Камруков А.С., Черненко Т.В., Володин Л.Ю., Петриков С.С., Полугов К.А., Багров В.В. и др. Бактерицидная эффективность излучения светодиода с длиной волны 272 нм в отношении госпитального штамма *Klebsiella pneumoniae*. Журнал им. Н.В.Склифосовского Неотложная медицинская помощь. 2023;12(3):376–385. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2023-12-3-376-385>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Благодарность, финансирование

Исследование не имеет спонсорской поддержки

АКБ — аккумуляторная батарея
ДНК — дезоксирибонуклеиновая кислота
КОЕ — колониеобразующая единица
УФ — ультрафиолетовое

УФ-В — ультрафиолетовое излучение в спектральном диапазоне 280–315 нм
УФ-С — ультрафиолетовое излучение в спектральном диапазоне 200–280 нм

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время со стороны ведущих медицинских специалистов в нашей стране и за рубежом проявляется значительный интерес к новым медицинским ультрафиолетовым (УФ) технологиям, к которым относятся в том числе и коротковолновые светодиодные технологии (*Deep UV LED-Technologies*) [1–6]. Специфические особенности таких технологий и технических средств на их основе — безопасность и экологичность («безртутность»), компактность, возможность управления спектральными и временными характеристиками излучения и др. — стимулируют интерес к их исследованию и разработкам. Однако их потенциальные возможности для лечения ран и инфекционных заболеваний на сегодняшний день практически не исследованы, что определяет актуальность экспериментов, направленных на изучение биоцидных и терапевтических свойств коротковолновых УФ светодиодов.

Целью настоящей работы являлась микробиологическая оценка бактерицидной эффективности излучения 272 нм светодиода в отношении госпитальных штаммов бактерии *Klebsiella pneumoniae* при высоких уровнях контаминации поверхности.

Бактерия *K. pneumoniae* относится к условно патогенным, грамотрицательным микроорганизмам и может вызывать различные инфекции, включая пневмонию, сепсис, инфекции мочевыводящих путей, абсцессы в печени и др. Она является распространенной причиной внутрибольничных инфекций, в том числе вызываемых штаммами, устойчивыми к антибиотикам, даже к тем, которые применяются в крайних случаях. Количественных данных по чувствительности бактерий клебсиеллы к УФ излучению немного, дозовые характеристики инактивации носят ограниченный характер и в основном определены при длине волны УФ излучения 254 нм и использовании ртутных ламп [7–12]. Данные по чувствительности бактерий *Klebsiella pneumoniae* к излучению современных УФ светодиодов с длиной волны 272 нм на сегодняшний день в опубликованных источниках отсутствуют.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Эксперименты проведены в НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского и НИИ медицины труда им. Н.Ф. Измерова.

Техническим объектом исследований являлся разработанный в НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана экспериментальный образец светодиодного аппарата УФ облучения, в перспекти-

ве предназначенный для оперативной УФ дезинфекции микробиологически загрязненных поверхностей, терапии ран и инфекционных заболеваний.

Аппарат выполнен в виде моноблока, включающего облучатель и встроенный источник питания на основе аккумуляторной батареи (АКБ). Принцип действия аппарата основан на облучении поверхностей объектов площадью до 100 см² (за один сеанс) узкополосным УФ излучением, генерируемым коротковолновыми светодиодами. Спектр излучения применяемых светодиодов имеет максимум на длине волны 272 нм и полуширину ~12 нм (рис. 1).

В облучателе аппарата использованы 5 светоизлучающих диодов с суммарной мощностью УФ излучения 475 мВт, размещенных на панели диаметром 50 мм. Светодиоды работают в непрерывном режиме излучения, потребляемая электрическая мощность аппарата ~10 Вт. Питание осуществляется от встроенной АКБ емкостью 1,5 А/ч с напряжением 18 В. Длительность непрерывной работы АКБ от одной зарядки — 2 часа; масса аппарата с АКБ — 850 г.

Спектрально-энергетические измерения характеристик излучения аппарата выполнены с использованием калиброванных средств измерения: волоконно-оптического спектрометра *Solar S100* на базе датчика изображения S8378-1024 (производство компании *Hamamatsu*, Япония) с косинусным корректором и фотодетектора *TOCON C8* (производство фирмы *SGLUX GmbH*, Германия). Для абсолютной калибровки измерительных средств использовали эталонный источник излучения *DH-3PLUS CAL* (производство компании

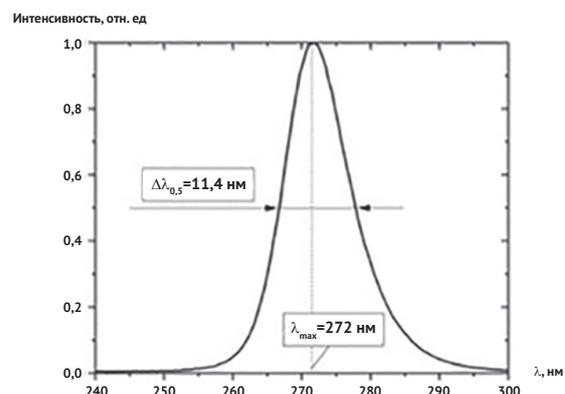


Рис. 1. Спектр излучения аппарата
Fig. 1. Radiation spectrum of the device

Ocean Optics (Ocean Insight), США), в состав которого входят дейтериевая и галогеновая лампы.

Согласно проведенным измерениям, в плоскости, удаленной на расстояние 10 см от облучателя (13 см от панели светодиодов), диаметр УФ пятна составляет ~12 см по уровню половинной интенсивности. В пятне диаметром 10 см неравномерность облученности не превышает 25%. Максимальная энергетическая освещенность в УФ области спектра на расстоянии $L=10$ см от облучателя составляла $\sim 0,67$ мВт/см², при этом в УФ-С диапазоне ($\Delta\lambda=200-280$ нм) излучается ~80% всей излучаемой мощности; остальные 20% приходятся на область УФ-В ($\Delta\lambda=280-315$ нм). За один сеанс облучения (с установленной в аппарате продолжительностью сеанса ~12 с) в центре пятна на расстоянии 10 см от облучателя достигается доза УФ излучения, равная ~8 мДж/см².

Микробиологическим тест-объектом исследования являлись бактерии *K. pneumoniae*. В экспериментах использовали клинический штамм бактерии *K. pneumoniae*, выделенный из крови больного, находившегося на лечении в реанимационном отделении НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского.

Штамм характеризовался множественной лекарственной устойчивостью: являлся продуцентом бета-лактамаз расширенного спектра, был устойчивым к антибиотикам из групп цефалоспоринов, фторхинолонов, аминогликозидов и карбапенемов; сохранял чувствительность к тигециклину и колистину.

Забор крови у пациента проводили из периферической вены с соблюдением правил асептики. Для исследования одномоментно отбирали по 10 мл крови в два флакона: *BactecTM Plus Aerobic/F Culture Vials* и *BactecTM Plus Anaerobic/F Culture Vials*. Полученные образцы крови в лаборатории помещали в анализатор гемокультур *Bactec FX (BD, США)*, и через 18 часов инкубирования содержимое флаконов высевали на 5% кровяной агар. После получения роста бактерий на плотной питательной среде производили идентификацию микроорганизма с использованием масс-спектрометра *VITEK MS (bioMérieux, Франция)* и определяли чувствительность к антибиотикам на анализаторе *VITEK-2 Compact (bioMérieux, Франция)*.

В стерильном физиологическом растворе приготавливали суспензию суточной культуры *K. pneumoniae* с концентрацией 10^8 микробных клеток в 1 мл (0,5 по МакФарланду). С помощью микрошприца 100 мкл суспензии переносили в чашку Петри диаметром 90 мм с мясопептонным агаром и равномерно растирали шпателем по поверхности агара, не доходя до стенок чашки на расстояние ~0,5 см (для минимизации пристеночных эффектов). Таким образом, поверхность диаметром ~8 см и площадью ~50 см² засеивалась 10^7 микробных клеток (КОЕ). Соответственно, начальная поверхностная плотность контаминации составляла $\sim 2 \cdot 10^5$ КОЕ/см². Засеянные поверхности подсушивали при комнатной температуре до полного высыхания.

Затем экспериментальные чашки Петри с засеянной культурой облучали светодиодным аппаратом, закрепленном в специальном штативе, позволяющем регулировать расстояние от облучателя до облучаемого объекта. В проведенных экспериментах расстояние от облучателя до контаминированной поверхности составляло 10 см (13 см от панели светодиодов). Изменение дозы УФ облучения осуществлялось варьированием продолжительности облучения,

которое изменялось в диапазоне от 6 до 120 секунд. Энергетические дозы УФ излучения при этом составляли 4–80 мДж/см². Исследования повторялись по 4 раза при каждой фиксированной продолжительности облучения.

После завершения облучения экспериментальные и контрольные (без облучения) чашки Петри помещали в термостат при 37°C на 24 часа. После инкубации проводили подсчет выросших колоний.

Исследования в НИИ медицины труда им. Н.Ф. Измерова проводили по аналогичной методике, но при исходном количестве бактерий на поверхности агара $N_0=7 \cdot 10^8$ КОЕ и в диапазоне применяемых доз от 22,5 до 136 мДж/см². Дополнительно проведены эксперименты по облучению бактерий *K. pneumoniae* ртутной лампой низкого давления ($\lambda=254$ нм) в диапазоне доз УФ излучения 25–200 мДж/см².

Эффективность обеззараживания определяли путем расчета логарифма инактивации, равного десятичному логарифму отношения исходного количества микроорганизмов в пробе N_0 к числу микроорганизмов N_i , выживших после облучения с дозой $D_i - \lg(N_0/N_i)$. Численное значение логарифма инактивации показывает, на сколько десятичных порядков снизилось исходное число бактерий после обработки с данной энергетической дозой.

Другой формой представления бактерицидной эффективности аппарата является эффективность обеззараживания, выраженная в процентах и равная отношению числа инактивированных (погибших) при данной дозе D_i бактерий N_i к числу изначально засеянных бактерий N_0

$$\eta_i = N_i/N_0 \cdot 100\% = (1 - N_i/N_0) \cdot 100\%.$$

Число девяток в численном значении η_i равно целому числу логарифма инактивации.

Результаты вычислений $\lg(N_0/N_i)$ и N_i/N_0 обрабатывали методами вариационной статистики с соответствующими расчетами среднего арифметического значения (\bar{X}), стандартного отклонения (σ_{n-1}), стандартной ошибки среднего значения ($\sigma_{\bar{X}_i}$), предельной ошибки выборки ($\pm \Delta_p$) и доверительного интервала [$\bar{X} - \Delta_p$; $\bar{X} + \Delta_p$] с доверительной вероятностью $p=0,95$.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n};$$

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n-1}};$$

$$\sigma_{\bar{X}_i} = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}};$$

$$\Delta_p = t_p \cdot \sigma_{\bar{X}_i}$$

где \bar{X}_i — опытное значение; n — число опытов ($n=4$); $t_p=2,353$ — коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности $p=0,95$ и числе опытов $n=4$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице представлен результат подсчета количества колоний *K. pneumoniae* после облучения светодиодным аппаратом чашек Петри с засеянной культурой

(исходное число бактерий — 10^7 КОЕ) в зависимости от продолжительности облучения и, соответственно, энергетической дозы УФ излучения. На контрольных чашках (без облучения) регистрировался сплошной газонный рост культуры *K. pneumoniae*.

На рис. 2 результаты опытов представлены в виде кривой выживаемости бактерий *K. pneumoniae* при УФ облучении аппаратом. По оси ординат в логарифмических координатах отложены числа выживших бактерий, по оси абсцисс — энергетическая доза УФ излучения. Кружки на графике соответствуют усредненным по четырем реализациям значениям чисел выживших бактерий при данной дозе УФ облучения, а горизонтальные полки — среднеквадратичному отклонению.

При дозах УФ излучения, равных или больших 48 мДж/см^2 , во всех 4 облученных чашках Петри не наблюдалось выживших колоний. Однако при графической интерпретации результатов опытов принято, что при дозе $D_i=48 \text{ мДж/см}^2$ значение $N_i=0,25 \text{ КОЕ}$, подразумеваемая под этим то, что вероятность обнаружения живой бактерии при данной дозе менее $1/4$ (нулевой результат в четырех реализациях).

Как следует из представленных данных, исследуемый светодиодный аппарат обеспечивает глубокое и оперативное обеззараживание контаминированной бактериями *K. pneumoniae* поверхности — уже при дозах 8 мДж/см^2 и за облучение в течение 12 секунд достигается снижение зараженности поверхности более чем на 6 порядков, то есть более чем в миллион раз (эффективность обеззараживания превышает 99,9999%).

Увеличение продолжительности облучения до 72 секунд (или соответственно дозы до 48 мДж/см^2) приводит к полной стерилизации поверхности при начальном уровне контаминации 10^7 КОЕ .

Однако отметим, что при увеличении энергетической дозы более 8 мДж/см^2 темп снижения уровня зараженности (то есть скорость инактивации) уменьшается, кривая выживаемости проявляет тенденцию к насыщению или выходу на «плато». Такой («двухфазный») вид кривой выживаемости определяется гетерогенностью облучаемой популяции бактерий, то есть наличием устойчивой к дезинфицирующему фактору (в данном случае — к УФ излучению) фракции бактерий клебсиеллы. Другая возможная причина образования «хвоста» кривой выживаемости связана с факторами небиологической природы, в частности, взаимным затенением бактерий при их высокой поверхностной плотности, характерной для условий проводимых экспериментов [7]. С увеличением плотности контаминации эффекты затенения должны усиливаться и, следовательно, эффективность обеззараживания при фиксированной дозе будет снижаться.

Если перестроить кривую выживаемости в виде зависимости от дозы относительного числа выживших бактерий N_i/N_0 (рис. 3), то линейная экстраполяция участка кривой, соответствующей большим дозам (то есть «хвосту»), на ось ординат даст долю резистентной фракции в исходной популяции бактерий γ . В условиях проведенных экспериментов эта доля составила $\gamma \approx 2 \cdot 10^{-7}$. Угол наклона ветвей кривой выживаемости к оси абсцисс α' или α'' (см. рис. 3) пропорционален чувствительности фракции бактерий к действию УФ излучения, а его котангенс определяет дозу D_{90} , при которой численность популяции данной фракции бактерий уменьшается в 10 раз (эффективность обезза-

Таблица

Количество выживших бактерий *K. pneumoniae* после ультрафиолетового облучения светодиодным аппаратом. Исходное число бактерий в чашках Петри равно 10^7 КОЕ

Table

The number of surviving *K.pneumoniae* bacteria after UV irradiation with an LED device. The initial number of bacteria in Petri dishes is 10^7 CFU

Время облучения, сек	Доза ультрафиолетового излучения D_p , мДж/см ²	Количество выживших бактерий, N_i , КОЕ			
		Номер чашки Петри			
		1	2	3	4
6	4	1500	1400	1500	2000
12	8	1	6	2	13
24	16	1	1	0	2
72	48	0	0	0	0
120	80	0	0	0	0

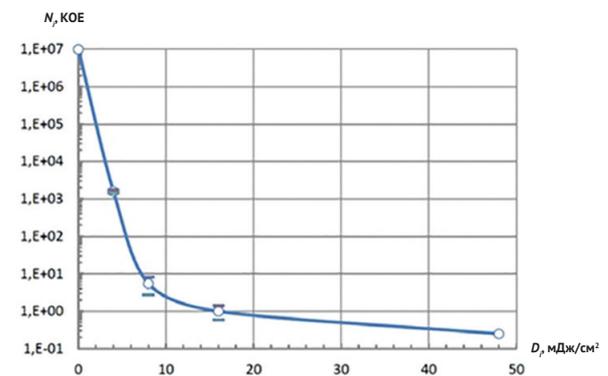


Рис. 2. Кривая выживаемости бактерий *K. pneumoniae* при ультрафиолетовом облучении светодиодным аппаратом. Горизонтальные полки соответствуют среднеквадратичному отклонению

Fig. 2. The survival curve of *K. pneumoniae* bacteria under UV irradiation with an LED device. Horizontal shelves correspond to the standard deviation

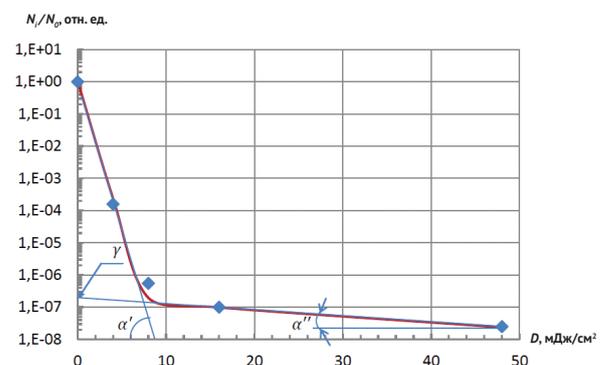


Рис. 3. Зависимость относительного числа выживших бактерий N_i/N_0 от дозы. Квадраты — эксперимент; сплошная толстая линия — аппроксимация

Fig. 3. Dependence of the relative number of surviving bacteria N_i/N_0 on the dose. Squares are an experiment; a solid thick line is an approximation

раживания — 90%). Чем больше угол наклона, тем чувствительнее фракция бактерий. Экспериментальные точки аппроксимируются функцией вида

$$\frac{N_i}{N_0} = (1 - \gamma) \cdot 10^{-\frac{D}{D_{90}}} + \gamma \cdot 10^{-\frac{D}{D_{90}}} \approx 10^{-\frac{D}{1.05}} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-\frac{D}{52}}$$

где $D'_{90} \approx 1,05$ мДж/см² и $D''_{90} \approx 52$ мДж/см² — дозы, уменьшающие численность популяции бактерий в 10 раз для чувствительной и резистентной фракций бактерий соответственно. Аппроксимационная функция представлена на рис. 3 сплошной толстой линией и демонстрирует достаточно хорошее соответствие аппроксимации экспериментальным данным (R^2 не менее 0,98). Эта функция может в дальнейшем использоваться для прогноза эффективности обеззараживания поверхностей светодиодными аппаратами рассматриваемого типа.

На рис. 4 приведены данные по эффективности инактивации бактерий *K. pneumoniae* УФ излучением, полученные в разных экспериментальных группах. Эффективность инактивации представлена в виде зависимости логарифма инактивации $lg(N_i/N_0)$ от энергетической дозы УФ излучения D .

Кривая 1 демонстрирует результаты настоящих исследований, проведенных с использованием светодиодного аппарата в диапазоне применяемых доз до 80 мДж/см² и исходном количестве бактерий на поверхности агара $N_0=10^7$ КОЕ. Значения логарифма инактивации приведены до дозы 48 мДж/см², начиная с которой во всех четырех исследуемых чашках Петри не наблюдался рост микрофлоры.

Кривая 2 отражает результаты исследований, проведенных в НИИ медицины труда им. Н.Ф. Измерова также с использованием данного светодиодного аппарата, но при исходном количестве бактерий на поверхности агара, равном $7 \cdot 10^8$ КОЕ и в диапазоне применяемых доз от 22,5 до 136 мДж/см², при этом при дозах, превышающих 70 мДж/см², в облученных чашках Петри регистрировались единичные колонии. Сравнение этих двух кривых указывает на хорошее соответствие экспериментальных результатов, полученных в разных лабораториях при различных начальных условиях.

Из рис. 4 видно, что вплоть до значений логарифма инактивации $lg(N_0/N_i) \approx 5,5$ его зависимость от дозы в полулогарифмических координатах носит линейный характер

$$lg(N_0/N_i) = k \cdot D_i = D_i/D_{90}$$

где k — константа инактивации (см²/мДж), численно равная D_{90}^{-1} .

При дозе $D_i = 4$ мДж/см² значение логарифма инактивации, согласно проведенным измерениям, составляет

$$lg(N_0/N_i) = 3,82 \pm 0,11.$$

Отсюда получаем величину дозы УФ излучения D_{90} , снижающую обсемененность поверхности бактериями *Klebsiella pneumoniae* в 10 раз,

$$D_{90} = D_i / lg(N_0/N_i) = 4 / (3,82 \pm 0,11) = (1,05 \pm 0,03) \text{ мДж/см}^2$$

Представляет интерес сравнение полученных значений дозовых характеристик для аппарата на основе светодиодов с центральной длиной волны $\lambda_{max} = 272$ нм и полушириной УФ спектра $\Delta\lambda_{0,5} = 12$ нм с имеющимися литературными данными.

В работе [7] сделан обзор доступных на период до 2008 года литературных данных по инактивации УФ излучением с длиной волны $\lambda = 254$ нм (ртутные

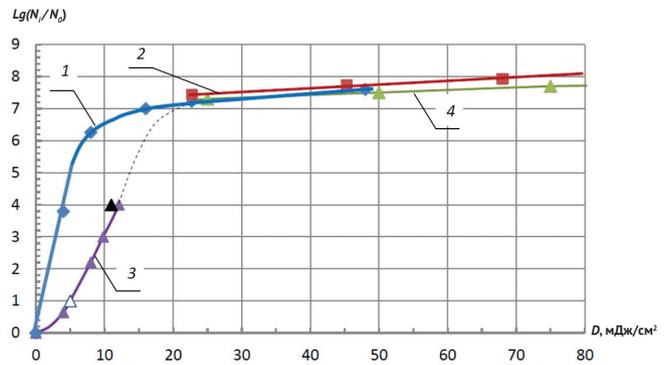


Рис. 4. Зависимость логарифма инактивации в отношении бактерий *K. pneumoniae* от энергетической дозы ультрафиолетового излучения. Квадраты — длина волны $\lambda = 272 \pm 6$ нм; треугольники — длина волны $\lambda = 254 \pm 1$ нм. Кривая 1 (синие квадраты) — $N_0 = 10^7$ КОЕ, эксперименты в НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского; кривая 2 (красные квадраты) — $N_0 = 7 \times 10^8$ КОЕ, эксперименты в НИИ медицины труда им. Н.Ф. Измерова; кривая 3 (фиолетовые треугольники) — данные из [5]; кривая 4 (зеленые треугольники) — $N_0 = 7 \times 10^8$ КОЕ, эксперименты в НИИ медицины труда им. Н.Ф. Измерова; белый треугольник — данные из [3]; черный треугольник — данные из [1, 2]; Пунктирная линия — возможная (гипотетическая) экстраполяция экспериментальной кривой 3

Fig. 4. Dependence of the logarithm of inactivation against *K. pneumoniae* bacteria on the energy dose of UV radiation.

Squares — wavelength $\lambda = 272 \pm 6$ nm; triangles — wavelength $\lambda = 254 \pm 1$ nm. Curve 1 (blue squares) — $N_0 = 10^7$ CFU; experiments at the N.V. Sklifosovsky Research Institute of Emergency Medicine; curve 2 (red squares) — $N_0 = 7 \times 10^8$ CFU; experiments at the N.F. Izmerov Research Institute of Occupational Medicine; curve 3 (purple triangles) — data from [5]; curve 4 (green triangles) — $N_0 = 7 \times 10^8$ CFU; experiments at the N.F. Izmerov Research Institute of Occupational Medicine; white triangle — data from [3]; black triangle — data from [1, 2]; The dotted line is a possible (hypothetical) extrapolation of the experimental curve 3

лампы низкого давления) бактерий, важных для задач биозащиты. Для бактерии *K. pneumoniae* со ссылкой на работу [8] приводится значение дозы, снижающей уровень бактериального загрязнения на 4 десятичных порядка, то есть D_{-4lg} , равное 11 мДж/см². Эта экспериментальная точка показана на рисунке треугольником черного цвета.

В монографии [9] со ссылкой на работу [10] для бактерии *K. pneumoniae* в воде и длины волны $\lambda = 254$ нм приводится значение дозы $D_{90} = 4,2$ мДж/см². Эти данные показаны треугольником белого цвета.

Наиболее часто цитируемой работой по УФ чувствительности бактерии *K. pneumoniae* является статья *Giese N. и Darby J.* [11]. В этой работе исследовались чувствительности колифага и ряда коолиформных бактерий, включая клебсиеллу, к узкополосному ($\Delta\lambda_{0,5} = 10$ нм) УФ излучению с центральными длинами волн 254 нм, 280 нм и 301 нм. В экспериментах использовалась ртутная лампа среднего давления с узкополосными оптическими фильтрами. В чашках Петри облучались суспензии бактериальных клеток с исходными концентрациями микроорганизмов на уровне 10^6 – 10^8 КОЕ/мл (в частности, концентрация бактерий *K. pneumoniae* составляла $1,7 \cdot 10^6$ КОЕ/мл). Результаты этих экспериментов с бактериями *K. pneumoniae* для длины волны $\lambda = 254$ нм приведены на рис. 4 в виде кривой 3. Эти же данные приведены в последнем обзоре [12], в котором отражено текущее (на 2021 год) состояние знаний о воздействии УФ излучения на различные

микроорганизмы; приводимые дозы рекомендуется использовать при проектировании, применении и тестировании технологий и систем ультрафиолетовой дезинфекции.

Отметим, что в ряде информационных источников (см. например, в [13] и [14]) приводятся со ссылкой на [11] дозовые характеристики бактерий *K. pneumoniae*, в частности, $D_{90} = 12$ мДж/см², $D_{-4lg} = 20$ мДж/см², которые отсутствуют в цитируемой работе. В связи с этим указанные данные здесь не обсуждаются.

Кривая 4 на рис. 4 отражает результаты экспериментов по облучению бактерий *Klebsiella pneumoniae* ртутной лампой низкого давления ($\lambda=254$ нм) при исходной контаминации поверхности агара $7 \cdot 10^8$ КОЕ (эксперименты выполнены в НИИ медицины труда им. Н.Ф. Измерова). Диапазон исследуемых доз УФ излучения составлял 25–200 мДж/см². Рост микрофлоры в облученных чашках Петри отсутствовал при дозах более 150 мДж/см².

Анализ представленных экспериментальных данных показывает следующее.

1. Дозовые характеристики инактивации бактерий *K. pneumoniae*, приводимые в различных источниках для излучения ртутных ламп ($\lambda=254$ нм), достаточно хорошо согласуются друг с другом. В частности, доза D_{90} варьируется у разных авторов в диапазоне 4,2–5,2 мДж/см²; дозы, необходимые для уменьшения популяции бактерий на 4 порядка, составляют $D_{-4lg} = 11–12$ мДж/см².

2. При малых энергетических дозах УФ излучения (D не более 12 мДж/см²) бактерицидная эффективность светодиодного аппарата в отношении бактерий *K. pneumoniae* на 3–4 порядка выше бактерицидной эффективности ртутных ламп. Так, при использовании ртутной лампы с дозой УФ излучения 10 мДж/см² бактериальная загрязненность снижается в 1000 раз, в то время как применение светодиодного аппарата сопровождается уменьшением исходной контаминации более чем в 6 миллионов раз ($lg(N_0/N_t) \approx 6,8$).

3. При дозах, больших 20 мДж/см², статистически значимые различия в эффективности обеззараживания поверхности, контаминированной бактериями *K. pneumoniae*, УФ излучением с длинами волн 254 и 272 нм отсутствуют.

Причины значительного различия в эффективности инактивации ртутных ламп и светодиодного аппарата при малых энергетических дозах не совсем понятны. Можно высказать ряд соображений в порядке гипотез, требующих в дальнейшем детального исследования и экспериментальной аргументации.

Первое соображение связано с возможным различием УФ чувствительности используемых в разных экспериментах бактерий клебсиеллы, обусловленное генетическими (различные штаммы бактерий) и фенотипическими различиями (различные условия размножения и роста, различный возраст и др.), а также различными условиями УФ облучения (бактерии в воде и на поверхности).

Другое объяснение может быть связано с различными спектральными характеристиками используемых источников УФ излучения. Ртутные лампы и светодиоды создают на биообъектах примерно одинаковую облученность — милливатты на квадратный сантиметр, поэтому основное их отличие может быть связано только с разными длинами волн излучения — ртутные лампы низкого давления излучают

узкую ($\Delta\lambda \sim 2$ нм) спектральную линию на длине волны $\lambda \sim 254$ нм, в то время как используемые в эксперименте светодиоды генерируют узкополосное ($\Delta\lambda \sim 12$ нм) УФ излучение с центром на $\lambda \sim 272$ нм. Известно [7, 9], что основной причиной инактивации бактерий под действием излучения с $\lambda \sim 254$ нм является образование тиминных димеров в ДНК (дезоксирибонуклеиновая кислота), приводящих в дальнейшем к нарушениям процессов транскрипции и репликации ДНК и невозможности деления (размножения) клеток. Максимум спектра поглощения тиминных оснований ДНК приходится на длины волн $\lambda_{\text{max}} \sim 265–266$ нм [9], и это лучше согласуется с эмиссионным спектром диода ($\lambda_{\text{max}} \sim 272$ нм), чем со спектром ртутной лампы низкого давления ($\lambda_{\text{max}} \sim 254$ нм).

Но, возможно, более существенным является гораздо лучшее соответствие спектра излучения светодиода спектру поглощения белков, максимум которого в области λ более 240 нм приходится на длины волн $\lambda_{\text{max}} \sim 280$ нм и обусловлен поглощением входящими в их состав ароматических аминокислот [9]. В спектральной области $\lambda \sim 240–255$ нм поглощение практически всех белков мало, и их фотодеструкция под действием излучения ртутной лампы будет гораздо менее эффективной, чем под действием излучения светодиода. В связи с этим вероятность образования дополнительных к димеризации пиримидинов ДНК нарушений в клетке, таких как сшивки белка с ДНК, нарушение транспортных свойств биомембран и др. при использовании светодиода возрастает.

Однако, по-видимому, более значимым фактором является разрушение белков (энзимов), участвующих в репаративных внутриклеточных процессах. Известно, что при малых дозах УФ излучения клетка способна устранять возникающие в ДНК дефекты и в первую очередь разрушать димеры тимина, восстанавливая первоначальную генетическую структуру ДНК. Этот процесс осуществляется с помощью специальных белков (энзимов), деструкция которых приводит к более быстрой инактивации бактерий под действием УФ излучения, то есть к повышению их фоточувствительности. На кривых выживаемости эффективность репаративных процессов проявляется в виде характерного «плеча» — очень низкой скорости инактивации при малых дозах УФ излучения (чем больше «плечо», тем более эффективно репарационная система клетки устраняет фотодефекты в ДНК).

В работе [11] при исследовании фоточувствительности бактерий клебсиеллы в воде под действием излучения с длинами волн 254 нм отмечено статистически значимое наличие «плеча» (см. рис. 4, кривая 3), свидетельствующее о работе систем репарации. В проведенных нами экспериментах наличие «плеча» на кривой выживаемости бактерий клебсиеллы при воздействии излучения светодиода с 272 нм не наблюдается (рис. 4, кривая 1), что указывает на низкую эффективность репаративных процессов (или их полное подавление). Как следствие, можно ожидать значительного повышения чувствительности бактерий к действию такого излучения.

При больших дозах УФ излучения роль репаративной системы становится не существенной даже в том случае, если не разрушаются белки, ответственные за восстановление ДНК-дефектов (происходит ее «насыщение»).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время применение ультрафиолетового излучения для дезинфекции объектов и терапии локализованных инфекционных заболеваний рассматривается как перспективная альтернатива химическим биоцидным средствам и антибиотикам. Развитие и продвижение данных технологий в санитарную и медицинскую практику в существенной степени определяется прогрессом в создании эффективных источников ультрафиолетового излучения, удовлетворяющих современным эколого-гигиеническим, экономическим и эргономическим требованиям. Коротковолновые — ультрафиолетовое излучение в спектральном диапазоне 200–280 и 280–315 нм — светоизлучающие диоды являются сравнительно новым типом источников ультрафиолетового излучения и потенциально способны удовлетворить требованиям актуальных медицинских и экологических технологий. В связи с этим исследование их функциональных возможностей, в частности, биоцидного действия в отношении различных патогенных микроорганизмов является актуальной научной и прикладной задачей.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование по оценке бактерицидной эффективности коротковолнового ультрафиолетового светодиода, излучающего в спектральной полосе 272 ± 6 нм, в отношении госпитальных штаммов бактерии *K. pneumoniae*. Эксперименты выполнены при высоких уровнях контаминации поверхности — $2 \cdot 10^5$ – 10^7 КОЕ/см².

Показано, что светодиодный аппарат с потребляемой электрической мощностью 10 Вт обеспечивает

глубокое и оперативное обеззараживание поверхности от госпитальных штаммов бактерий *K. pneumoniae*, характеризующихся множественной лекарственной устойчивостью.

Полученные результаты показывают перспективность применения ультрафиолетовых аппаратов на основе светодиодов с максимумом излучения на длине волны 272 нм в системах оперативного обеззараживания массивно контаминированных поверхностей, потенциально включая и раневые поверхности.

ВЫВОДЫ

1. Доза ультрафиолетового излучения в спектральной полосе 272 ± 6 нм, равная 8 мДж/см², снижает контаминацию поверхности бактериями *K. pneumoniae* более чем в миллион раз (эффективность обеззараживания более 99,9999%). Разработанный светодиодный аппарат с потребляемой электрической мощностью 10 Вт обеспечивает эту дозу с расстояния 10 см за сеанс облучения продолжительностью 12 секунд.

2. При дозах ультрафиолетового излучения менее 10 мДж/см² эффективность 272 нм-светодиодного аппарата в отношении инактивации бактерий *K. pneumoniae* на 3–4 порядка выше бактерицидной эффективности ртутных ламп; при дозах более 20 мДж/см² бактерицидные эффективности ртутной лампы и 272 нм-светодиода сравниваются.

3. Доза D_{90} , уменьшающая исходную контаминацию поверхности бактериями *K. pneumoniae* в 10 раз, для светодиодов с максимумом излучения на длине волны 272 нм составляет $1,05 \pm 0,03$ мДж/см².

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Gupta A, Avci P, Dai T, Huang YY, Hamblin MR. Ultraviolet Radiation in Wound Care: Sterilization and Stimulation. *Adv Wound Care*. 2013;2(8):422–437. <https://doi.org/10.1089/wound.2012.0366> PMID: 24527357
- Muramoto Y, Kimura M, Nouda S. Development and future of ultraviolet light emitting diodes: UV-LED will replace the UV lamp. *Semicon Sci Technol*. 2014;29(8):084004. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/29/8/084004>
- Rattanakul S, Oguma K. Inactivation kinetics and efficiencies of UV-LEDs against *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella pneumophila* and surrogate microorganisms. *Water Res*. 2018;130:31–37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.047> PMID: 29195159
- Nishisaka-Nonaka R, Mawatari K, Yamamoto T, Kojima M, Shimohata T, Uebanso T, et al. Irradiation by ultraviolet light-emitting diodes inactivates influenza A viruses by inhibiting replication and transcription of viral RNA in host cells. *J Photochem Photobiol B*. 2018;189:193–200. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.10.017> PMID: 30391908
- Cheng Y, Chen H, Sánchez Basurto LA, Protasenko VV, Bharadwaj S, Islam M, et al. Inactivation of *Listeria* and *E. coli* by Deep-UV LED: effect of substrate conditions on inactivation kinetics. *Sci Rep*. 2020;10(1):3411. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60459-8> PMID: 32099043
- Inagaki H, Saito A, Sugiyama H, Okabayashi T, Fujimoto Sh. Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with deep-UV LED irradiation. *Emerg Microbes Infect*. 2020;9(1):1744–1747. <https://doi.org/10.1080/22221751.2020.1796529> PMID: 32673522

REFERENCES

- Gupta A, Avci P, Dai T, Huang YY, Hamblin MR. Ultraviolet Radiation in Wound Care: Sterilization and Stimulation. *Adv Wound Care*. 2013;2(8):422–437. <https://doi.org/10.1089/wound.2012.0366> PMID: 24527357
- Muramoto Y, Kimura M, Nouda S. Development and future of ultraviolet light emitting diodes: UV-LED will replace the UV lamp. *Semicon Sci Technol*. 2014;29(8):084004. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/29/8/084004>
- Rattanakul S, Oguma K. Inactivation kinetics and efficiencies of UV-LEDs against *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella pneumophila* and surrogate microorganisms. *Water Res*. 2018;130:31–37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.047> PMID: 29195159

- Coolhill Th P, Sagripanti J-L. Overview of the Inactivation by 254 nm Ultraviolet Radiation of Bacteria with Particular Relevance to Biodefense. *Photochem Photobiology*. 2008;84(5):1084–1090. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2008.00387.x> PMID: 18627518
- Hoyer O. Testing performance and monitoring of UV systems for drinking water disinfection. *Water Supply*. 1998;16(1/2):419–442.
- Kowalski W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2009. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9>
- Zemke V, Podgorsek L, Schoenen D. Ultraviolet disinfection of drinking water. 1. Communication: Inactivation of *E. coli* and coliform bacteria. *Zentralbl Hyg Umweltmed*. 1990;190(1/2):51–61. PMID: 2203375
- Giese N, Darby J. Sensitivity of microorganisms to different wavelengths of UV light: Implications on modeling of medium pressure UV systems. *Water Research*. 2000;34(16):4007–4013. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00172-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00172-X)
- Masjoudi M, Mohseni M, Bolton J R. Sensitivity of Bacteria, Protozoa, Viruses, and Other Microorganisms to Ultraviolet Radiation. *J Research of NIST*. 2021;126:126021. <https://doi.org/10.6028/jres.126.021>
- Chevrefils G, Caron É, Wright H, Sakamoto G, Payment P, Barbeau B, et al. UV Dose Required to Achieve Incremental Log Inactivation of Bacteria, Protozoa and Viruses. *IUVA News*. 2006;8(1):38–44.
- Ultraviolet Light Disinfection Data Sheet. ClorDiSys, Rev.12-2020. Available at: <https://www.clordisys.com/pdfs/misc/UV%20Data%20Sheet.pdf> [Accessed 31 Aug, 2023]

- Nishisaka-Nonaka R, Mawatari K, Yamamoto T, Kojima M, Shimohata T, Uebanso T, et al. Irradiation by ultraviolet light-emitting diodes inactivates influenza A viruses by inhibiting replication and transcription of viral RNA in host cells. *J Photochem Photobiol B*. 2018;189:193–200. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.10.017> PMID: 30391908
- Cheng Y, Chen H, Sánchez Basurto LA, Protasenko VV, Bharadwaj S, Islam M, et al. Inactivation of *Listeria* and *E. coli* by Deep-UV LED: effect of substrate conditions on inactivation kinetics. *Sci Rep*. 2020;10(1):3411. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60459-8> PMID: 32099043

6. Inagaki H, Saito A, Sugiyama H, Okabayashi T, Fujimoto Sh. Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with deep-UV LED irradiation. *Emerg Microbes Infect.* 2020;9(1):1744–1747. <https://doi.org/10.1080/22221751.2020.1796529> PMID: 32673522
7. Coohill Th P, Sagripanti J-L. Overview of the Inactivation by 254 nm Ultraviolet Radiation of Bacteria with Particular Relevance to Biodefense. *Photochem Photobiology.* 2008;84(5):1084–1090. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2008.00387.x> PMID: 18627518
8. Hoyer O. Testing performance and monitoring of UV systems for drinking water disinfection. *Water Supply.* 1998;16(1/2):419–442.
9. Kowalski W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook.* Berlin, Heidelberg: Springer; 2009. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01999-9>
10. Zemke V, Podgorsek L, Schoenen D. Ultraviolet disinfection of drinking water. 1.Communication: Inactivation of E. coli and coliform bacteria. *Zentralbl Hyg Umweltmed.* 1990;190(1/2):51–61. PMID: 2203373
11. Giese N, Darby J. Sensitivity of microorganisms to different wavelengths of UV light: Implications on modeling of medium pressure UV systems. *Water Research.* 2000;34(16):4007–4013. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00172-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00172-X)
12. Masjoudi M, Mohseni M, Bolton J R. Sensitivity of Bacteria, Protozoa, Viruses, and Other Microorganisms to Ultraviolet Radiation. *J Research of NIST.* 2021;126:126021. <https://doi.org/10.6028/jres.126.021>
13. Chevrefils G, Caron É, Wright H, Sakamoto G, Payment P, Barbeau B, et al. UV Dose Required to Achieve Incremental Log Inactivation of Bacteria, Protozoa and Viruses. *IUVA News.* 2006;8(1):38–44.
14. Ultraviolet Light Disinfection Data Sheet. ClorDiSys, Rev.12-2020. Available at: <https://www.clordisys.com/pdfs/misc/UV%20Data%20Sheet.pdf> [Accessed 31 Aug, 2023]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Камруков Александр Семенович

кандидат технических наук, доцент, заведующий отделом НИИ энергетического машиностроения ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»;

<https://orcid.org/0000-0003-0584-2234>, kamrukov@mail.ru;

13%: концепция статьи, анализ полученных данных, написание текста статьи

Черненко Татьяна Витальевна

кандидат медицинских наук, заведующая научной лабораторией клинической микробиологии ГБУЗ «НИИ СП им. Н. В. Склифосовского ДЗМ»;

<https://orcid.org/0000-0002-6167-7117>, chernenkayat@rambler.ru,

12%: проведение экспериментальной части исследования, анализ полученных данных, написание текста статьи

Володин Лев Юрьевич

ведущий инженер НИИ энергетического машиностроения ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»;

<https://orcid.org/0000-0003-3986-487X>, volodinlu@yandex.ru;

11%: проведение экспериментальной части исследования, анализ полученных данных

Петриков Сергей Сергеевич

член-корр. РАН, доктор медицинских наук, профессор, директор ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ»;

<https://orcid.org/0000-0003-3292-8789>, sklif@zdrav.mos.ru;

10%: концепция статьи, утверждение окончательного варианта

Попугаев Константин Александрович

доктор медицинских наук, профессор, заместитель директора ГБУЗ «НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗМ»

<https://orcid.org/0000-0002-6240-820X>, stan.popugaev@yahoo.com,

10%: концепция статьи, анализ полученных данных, утверждение окончательного варианта

Багров Валерий Владимирович

кандидат технических наук, заместитель директора НИИ энергетического машиностроения ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»;

<https://orcid.org/0000-0001-9059-6984>, bagrovvv@outlook.com;

9%: концепция статьи, утверждение окончательного варианта

Бухтияров Игорь Валентинович

член-корр. РАН, доктор медицинских наук, профессор, директор ФГБНУ НИИ МТ;

<https://orcid.org/0000-0002-8317-2718>, bukhtiyarov@iriioh.ru;

9%: анализ полученных данных, утверждение окончательного варианта

Зибарев Евгений Владимирович

кандидат медицинских наук, заместитель директора ФГБНУ НИИ МТ;

<https://orcid.org/0000-0002-5983-3547>, zibarev@iriioh.ru;

9%: проведение экспериментальной части исследования, утверждение окончательного варианта

Семенов Кирилл Андреевич

ведущий инженер НИИ энергетического машиностроения ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»;

<https://orcid.org/0000-0002-0397-4009>, kir_semenov@mail.ru;

9%: проведение экспериментальной части исследования

Крылов Владимир Иванович

кандидат технических наук, директор НИИ энергетического машиностроения ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»;

<https://orcid.org/0000-0002-3880-4827>, kvi@bmstu.ru;

8%: редактирование первичного материала, утверждение окончательного варианта

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Germicidal Efficiency of 272 nm LED in Relation to the Hospital Strain of *Klebsiella Pneumoniae*

A.S. Kamrukov¹ ✉, T.V. Chernenkaya², L.Yu. Volodin¹, S.S. Petrikov², K.A. Popugaev², V.V. Bagrov¹, I.V. Bukhtiyarov³, E.V. Zibarev³, K.A. Semenov¹, V.I. Krylov¹

Institute of Power Engineering

¹ Bauman Moscow State Technical University

bldg. 1, 5, 2nd Baumanskaya Str., 105005, Moscow, Russian Federation

² N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine

3, B. Sukharevskaya Sq., 129090, Moscow, Russian Federation

³ Izmerov Research Institute of Occupational Health

31 Budyonny Ave., 105275, Moscow, Russian Federation

✉ **Contacts:** Alexander S. Kamrukov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Email: kamrukov@mail.ru

RELEVANCE Currently, the use of ultraviolet (UV) radiation for the disinfection of objects and the treatment for infectious diseases is considered as a promising alternative to chemical biocides and antibiotics. Shortwave – UV-C and UV-B -light emitting diodes (LED) are a relatively new type of UV radiation sources and potentially able to meet the requirements of current medical technologies. However, their possibilities for the treatment of wounds and infectious diseases have not been practically researched to date, which determines the relevance of experiments aimed at studying the biocidal and therapeutic properties of short-wavelength UV LEDs.

PURPOSE OF STUDY To evaluate the bactericidal efficacy of 272 nm LED radiation against hospital strains of *Klebsiella pneumoniae* bacteria characterized by multidrug resistance.

MATERIAL AND METHODS The studies were carried out with an experimental sample of the LED apparatus for UV irradiation. In the irradiator of the device, 5 LEDs are installed with a maximum radiation at a wavelength of 272 nm and a total electrical power of 10 watts. The UV radiation dose achieved in one irradiation session (12 seconds) at a distance of 10 cm from the irradiator was 8 mJ/cm². In the experiments, a hospital strain of the bacterium *Klebsiella pneumoniae*, isolated from the patient's blood, was used. The strain was characterized by multidrug resistance. A daily culture suspension of *K. pneumoniae* with a concentration of 10⁸ CFU/ml in a volume of 100 µl was transferred into a Petri dish with a diameter of 9 cm with meat-peptone agar and evenly distributed over a surface with a diameter of 8 cm. Petri dishes were irradiated from a distance of 10 cm from the irradiator. The change in the dose of UV irradiation from 4 to 80 mJ/cm² was carried out by varying the exposure time. Studies were carried out in 4 repetitions at each dose. After irradiation, the experimental and control (without irradiation) Petri dishes were placed in a thermostat at 37°C for 24 hours, then the grown colonies were counted. A total of 60 experiments were carried out.

RESULTS As a result of the research, it was shown that the LED device based on five 272 nm diodes provides deep and prompt disinfection of the surface from hospital strains of *K. pneumoniae* bacteria characterized by multidrug resistance. A dose of UV radiation of 8 mJ/cm² reduces surface contamination with *K. pneumoniae* bacteria by more than a million times (decontamination efficiency over 99.9999%). At doses less than 10 mJ/cm², the efficiency of the 272 nm LED device in terms of inactivation of *K. pneumoniae* bacteria is 3–4 times higher than the bactericidal efficiency of mercury lamps.

CONCLUSION The prospects of using UV devices based on LEDs with a maximum radiation at a wavelength of 272 nm in systems for the operational disinfection of massively contaminated surfaces, potentially including wound surfaces, have been shown.

Keywords: ultraviolet LED, bactericidal efficacy, surface contamination, hospital strain of *Klebsiella pneumoniae*

For citation Kamrukov AS, Chernenkaya TV, Volodin LYu, Petrikov SS, Popugaev KA, Bagrov VV et al. Germicidal Efficiency of 272 nm LED in Relation to the Hospital Strain of *Klebsiella Pneumoniae*. *Russian Sklifosovsky Journal of Emergency Medical Care*. 2023;12(3):376–385. <https://doi.org/10.23934/2223-9022-2023-12-3-376-385> (in Russ.)

Conflict of interest Authors declare lack of the conflicts of interests

Acknowledgments, sponsorship The study had no sponsorship

Affiliations

Alexander S. Kamrukov	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University; https://orcid.org/0000-0003-0584-2234 , kamrukov@mail.ru; 13%, concept of the article, analysis of the data obtained, text writing
Tatyana V. Chernenkaya	Candidate of Medical Sciences, Head, Scientific Laboratory of Clinical Microbiology, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine; https://orcid.org/0000-0002-6167-7117 , chernenkayat@rambler.ru; 12%, conducting the experimental part of the study, analyzing the data obtained, writing the text of the article
Lev Yu. Volodin	Leading Engineer, Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University; https://orcid.org/0000-0003-3986-487X , volodinlu@yandex.ru; 11%, conducting the experimental part of the study, analyzing the data obtained
Sergey S. Petrikov	Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Director, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine; https://orcid.org/0000-0003-3292-8789 , sklif@zdrav.mos.ru; 10%, concept of the article, approval of the final version
Konstantin A. Popugaev	Doctor of Medical Sciences, Professor, Deputy Director, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine; https://orcid.org/0000-0002-6240-820X , stan.popugaev@yahoo.com; 10%, concept of the article, analysis of the obtained data, approval of the final version
Valery V. Bagrov	Candidate of Technical Sciences, Deputy Director, Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University, https://orcid.org/0000-0001-9059-6984 , bagrovvv@outlook.com; 9%, concept of the article, approval of the final version
Igor V. Bukhtiyarov	Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Director, Izmerov Research Institute of Occupational Health; https://orcid.org/0000-0002-8317-2718 , bukhtiyarov@irioh.ru; 9%, analysis of the received data, approval of the final version
Evgeny V. Zibarev	Candidate of Medical Sciences, Deputy Director, Izmerov Research Institute of Occupational Health, https://orcid.org/0000-0002-5983-3547 , zibarev@irioh.ru; 9%, conducting the experimental part of the study, approval of the final version

Kirill A. Semenov

Leading Engineer, Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University;
<https://orcid.org/0000-0002-0397-4009>, kir_semenov@mail.ru;
9%, conducting the experimental part of the study

Vladimir I. Krylov

Candidate of Technical Sciences, Director, Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University;
<https://orcid.org/0000-0002-3880-4827>, kvi@bmstu.ru;
8%, editing of primary material, approval of the final version

Received on 22.04.2022

Review completed on 26.06.2023

Accepted on 27.06.2023

Поступила в редакцию 22.04.2022

Рецензирование завершено 26.06.2023

Принята к печати 27.06.2023