

УДК 614.485; 614.487  
EDN: BXQZWY

PACS: 87.50; 92.60.Sz

## Применение УФ-излучения 222 нм эксимерных KrCl-ламп для дезинфекции

© Л. М. Василяк<sup>1,\*</sup>, Н. Н. Кудрявцев<sup>2</sup>, С. В. Костюченко<sup>3</sup>, Д. О. Сивин<sup>3</sup>, И. С. Тимофеев<sup>3</sup><sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

\* E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт, Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия<sup>3</sup> НПО «ЛИТ», Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 РоссияСтатья поступила в редакцию 16.06.2025; после доработки 15.08.2025; принята к публикации 20.10.2025  
Шифр научной специальности: 1.3.21

*Выполнен анализ перспективности применения УФ-излучения 222 нм эксимерных KrCl-ламп для обеззараживания воздуха и поверхностей. Предполагаемые основные преимущества излучения 222 нм, заключающиеся в возможности проводить обеззараживание в присутствии людей, и более высокая бактерицидная эффективность по сравнению с длиной волны 254 нм ртутных и амальгамных ламп низкого давления, проходят экспериментальную проверку. Исследования показывают противоречивые результаты о безопасности такого излучения для кожи и для глаз млекопитающих. Инактивация вирусов и простых бактериологических штаммов УФ-излучением 222 нм и 254 нм достигается при аналогичных УФ-дозах, однако для более крупных объектов (эндоспоры, грибы, гифы грибов) существенное преимущество имеет УФ-излучение 254 нм. Эффективность генерации УФ-излучения 222 нм в промышленных KrCl-лампах составляет 3–5 %, что существенно меньше, чем для ртутных и амальгамных ламп низкого давления 30–35 %.*

*Ключевые слова:* воздух; обеззараживание; УФ-излучение; 222 нм.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-5-7-14

### Введение

Пандемия COVID-19 показала, что обеззараживание воздуха и поверхностей в помещениях остается важной задачей, и стимулировала новые исследования в области хорошо зарекомендовавшей себя технологии обеззараживания бактерицидным УФ-излучением, которая эффективно снижает передачу патогенов воздушно-капельным путем [1]. Основным источником бактерицидного УФ-излучения с длиной волны 254 нм (УФ-254 нм), которое воздействует на ДНК и РНК микроорганизмов, являются ртутные и амальгамные лампы низкого давления. В качестве альтернативы предлагается использовать УФ-излучение с длинами волн 200–235 нм, в частности излу-

чение эксимерной лампы на основе криптона и хлора (KrCl) с длиной волны 222 нм (УФ-222 нм). Отмечалось, что для ряда микроорганизмов эффективность обеззараживания УФ-излучением 222 нм выше по сравнению с 254 нм, а также предполагалось, что обеззараживание можно проводить в присутствии людей, т. к. глубина проникновения УФ-излучения 222 нм в кожу человека составляет всего несколько микрометров, оно полностью поглощается роговым слоем кожи из мертвых клеток и не может достичь живых клеток в слое эпидермиса [1–5]. В связи с этим, рассмотрим состояние исследований эффективности обеззараживания УФ-излучением 222 нм от эксимерных KrCl-ламп и безопасности его применения, в том числе в присутствии людей.

## Экцимерная KrCl-лампа

В настоящее время наиболее перспективным источником дальнего бактерицидного УФ-излучения является эксимерная лампа на основе криптона и хлора (KrCl) с длиной волны основного пика излучения 222 нм [5–10]. Типичная конструкция эксимерной лампы представляет собой цилиндрическую коаксиальную колбу с внешней и внутренней стенкой из кварцевого стекла, заполненную смесью криптона и небольшого количества хлора, а также два электрода: внутренний электрод в виде сплошной металлической трубки и внешний электрод из металлической проволочной сетки. Барьерный разряд в лампе создается импульсами высокого напряжения амплитудой 4–10 кВ.

На рисунке представлен спектр излучения эксимерной KrCl-лампы.

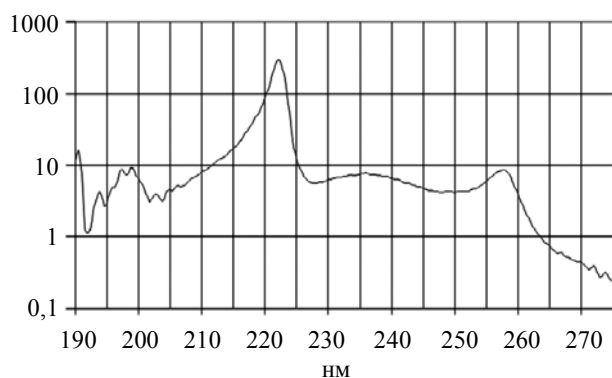


Рис. Распределение спектральной мощности излучения KrCl-лампы

Видно, что основная мощность УФ-излучения сосредоточена в области линии 222 нм и есть незначительное количество излучения в областях ниже 210 нм и выше 230 нм. Некоторые производители ламп применяют специальные дополнительные фильтры для пропускания основной линии 222 нм и подавления излучения других длин волн. Для эксимерных ламп характерна высокая предельная погонная электрическая мощность до  $1 \text{ Вт/см}^2$  при высоких частотах следования импульсов высокого напряжения (100 кГц), что выше, чем для ртутных ламп низкого давления, но меньше, чем для амальгамных ламп. Стоимость источников питания для эксимерных ламп выше, чем источников для амальгамных ламп аналогичной мощности. Неоспоримым преимуще-

ством эксимерных ламп для специальных условий является отсутствие ртути. Большинство производителей указывают время жизни KrCl-ламп не более 4000–5000 час, при этом не указывается спад УФ-излучения в конце срока службы. Для сравнения отметим, что рабочий ресурс амальгамных и ртутных ламп низкого давления составляет 8–16 тысяч часов при гарантированном спаде УФ-излучения не более 15 %. Электрическая мощность серийно выпускаемых KrCl-ламп лежит в диапазоне от 2 до 800 Вт при длине колбы от 6 до 100 см [10]. Эффективность генерации УФ-222 нм в лабораторных устройствах может достигать 15 %, но в промышленных лампах обычно составляет 3–5 %, что почти на порядок меньше эффективности генерации УФ-254 нм ртутными и амальгамными лампами низкого давления. Одним из недостатков мощных эксимерных ламп является необходимость дополнительного охлаждения колбы мощных ламп для обеспечения указанного изготовителем потока УФ-излучения и максимального срока службы лампы, что является сложной технической задачей в реальных условиях эксплуатации.

## Бактериологическое действие УФ-излучения с длиной волны 222 нм

Основная декларируемая концепция преимуществ обеззараживания излучением УФ-222 нм заключается в том, что оно может эффективно инактивировать микроорганизмы и вирусы без вреда для кожи и глаз млекопитающих [2–4, 11–22]. УФ-222 нм хорошо поглощается белками (особенно пептидными связями в них) и другими биомолекулами [13], поэтому глубина его проникновения составляет несколько микрометров в наружных слоях омертвевшей кожи, что на порядок меньше по сравнению с излучением 254 нм [11, 14]. Поскольку по нормативам США предельно допустимые суточные дозы (флуенсы) УФ-222 нм ( $25 \text{ мДж/см}^2$ ) в четыре раза выше, чем для 254 нм ( $6 \text{ мДж/см}^2$ ), то это является дополнительным стимулом проведения исследований. Еще одной концепцией было предположение, что эффективность воздействия УФ-222 нм будет выше, чем для 254 нм, поэтому требуемые дозы (флуенсы) для инактивации микро-

организмов будут ниже. Однако, эффективность инактивации для разных типов бактерий и спор оказалась как выше, так и ниже, чем для излучения 254 нм [3, 8, 9, 17, 18]. Для инактивации исследованных вирусов дозы УФ-излучения 200–230 нм оказалась ниже, чем для УФ-254 нм. По мере уменьшения длины волны увеличивается поглощение излучения белками [8, 9, 11], и повреждение белков начинает также играть роль в эрадикации [8, 9, 16].

УФ-излучение 222 нм при одинаковых дозах инактивирует золотистый стафилококк *Staphylococcus aureus* на модельной человеческой коже так же эффективно, как 254 нм [3, 8, 9]. В [17, 18] показано, что оба вида излучения УФ-222 нм и 254 нм одинаково эффективно инактивировали различные бактерии, однако при обработке эндоспор *Bacillus cereus* и *Clostridium sporogenes* и штаммов грибов *Aspergillus niger* и *Trichophyton rubrum* эффективность УФ-254 нм была существенно выше, чем 222 нм. Например, для инактивации спор *Aspergillus niger* излучением 222 нм необходима доза 500 мДж/см<sup>2</sup>, а для излучения 254 нм доза в два раза меньше. Рост грибов и образование гиф *Aspergillus niger* значительно ингибировался при дозе УФ-254 нм 250 мДж/см<sup>2</sup>, тогда как для излучения 222 нм даже при дозе 1000 мДж/см<sup>2</sup> было отмечено лишь минимальное влияние на рост гиф [17, 18].

Различия в радиационной чувствительности микроорганизмов могут зависеть от их размера и размера генома, а также, например, в случае вирусов, от наличия вирусной оболочки (вирусы с оболочкой и без оболочки), от толщины оболочки и белков в ней. Например, пигментация микроорганизмов (некоторые виды грибов) также может быть причиной снижения чувствительности к УФ-излучению.

Инактивация вирусов УФ-излучением 200–230 нм достигается при меньших дозах, чем при УФ-254 нм [8, 9, 17, 18]. Например, инактивация аналогов человеческих коронавируса из подгрупп альфа (HCoV-229E) и бета (HCoV-OC43) с эффективностью 99,9 % была получена при дозах облучения 1,7 и 1,2 мДж/см<sup>2</sup>, соответственно [5], что существенно ниже доз для 254 нм, полученных для коронавируса SARS-CoV2. В [5] отмечается,

что излучение 222 нм эффективно воздействует на вирусы и микроорганизмы с размерами менее 5 мкм, но при этом указывается на то, что эффективность воздействия на более крупные объекты пока исследована недостаточно. В [8, 9] приведены сравнительные данные, по инактивации бактерий и вирусов различными УФ-излучением с различными длинами волн от разных эксимерных ламп. В этих работах также отмечается, что инактивация бактерий излучением с длинами волн 222 нм и 254 нм примерно одинаковое, однако УФ-222 нм значительно эффективнее для инактивации вирусов. Причин повышенной чувствительности фагов к излучению в диапазоне 200–240 нм по сравнению с УФ-254 нм может быть несколько [8, 9]. Одно из предположений состоит в том, что коротковолновое УФ-излучение повреждает не только нуклеиновую кислоту вируса (ДНК или РНК), но и белки, образующие капсид (оболочку вируса). Эти белки не только защищают нуклеиновую кислоту вируса, но и обеспечивают адсорбцию (прикрепление) вируса к клетке-хозяину, в результате чего они теряют способность к заражению.

Из-за увеличения поглощения и рассеяния на белках с уменьшением длины волны глубина проникновения в биологическую ткань уменьшается [11, 13, 14], что в зависимости от условий воздействия может привести к ослаблению инактивации микроорганизмов. В исследовании [19] было показано, что пот, альбумин и раневой экссудат (выделение), используемые в качестве среды для облучения микроорганизмов, значительно снижают инактивирующий эффект излучения 222 нм по сравнению с излучением 254 нм. Поскольку микроорганизмы в воздухе находятся в аэрозолях, а на поверхности часто покрыты белковыми слоями, то излучение 222 нм будет поглощаться значительно сильнее, чем 254 нм, в результате чего при практических применениях реальные дозы для обеззараживания для УФ-222 нм будут значительно превышать дозы, полученные при исследованиях в идеальных лабораторных условиях. Следует отметить, что бактерицидная эффективность УФ-222 нм измерена для ограниченного круга микроорганизмов, и требуются значительные исследования для широкого круга патогенов, и иссле-

дования влияния окружающей среды на эффективность обеззараживания.

### Безопасность УФ-излучения с длиной волны 222 нм

Безопасность облучения УФ-222 нм в присутствии людей в основном оценивали по повреждениям ДНК в эукариотических клетках кожи с использованием моделей *in vitro* и *in vivo* [2, 3, 15]. В [16] было показано, что в клетках человека и животных облучение вызывало образование небольшого количества димеров ДНК (маркеров рака), которые исчезали через 24 часа. УФ-излучение 222 нм не вызывало эритему даже при самой высокой дозе и не приводит к гибели клеток или возникновению воспалительной реакции [16]. Однако в [4] было показано, что при дозе 40 мДж/см<sup>2</sup> в реконструированной коже человека образуются радикальные соединения. В [20, 21] показано, что существует вероятность возникновения рака при облучении полным спектром излучения от KrCl-лампы без использования оптического полосного фильтра для отсека коротковолнового и длинноволнового участков спектра относительно длины волны 222 нм. Лампы с фильтром не вызывали повышенных уровней димеров ДНК (маркеров рака) при суточной дозе 23 мДж/см<sup>2</sup>. Применение таких фильтров приведет к общему снижению интенсивности излучения источника и повышению стоимости оборудования. Также пока не исследован вопрос о стабильности таких фильтров при длительности работы несколько тысяч часов.

Исследование [22] показало, что при воздействии УФ-254 нм образование активных форм кислорода и воспалительные реакции происходят намного сильнее, чем при УФ-222 нм. Образование активных форм кислорода происходит даже при допустимых по санитарным нормам США дозах 25 мДж/см<sup>2</sup>, которое может замедлить процесс регенерации кожи в течение 48 часов. Исследования длительного (до 40 дней) непрямого воздействия излучения 222 нм допустимыми предельными дозами 25 мДж/см<sup>2</sup> [22] показали, что оно вызывает незначительные повреждения кожи. Однако эти повреждения все же

наблюдаются, а также присутствуют морфологические изменения кожи, что может нести серьезную опасность в перспективе длительного периодического воздействия, в том числе преждевременное старение кожи. Авторы [22] делают вывод, что изменения в механизмах регенерации кожи вызывают опасения по поводу прямого воздействия УФ-222 нм.

С точки зрения безопасности УФ-излучения 222 нм для глаз эксперименты на крысах показали, что до сетчатки и хрусталика излучение не доходит и поглощается внешними слоями эпителия роговицы (с небольшим истончением при очень высоких дозах) [23]. Это позволяет предполагать, что серьезных последствий для человека не возникнет. Исследования воздействия дальнего УФ-излучения на глаза продолжаются, и однозначного ответа о безопасности пока не получено. Для использования УФ-222 нм в общественных местах в присутствии людей необходимо провести исследования с хроническим облучением, обязательно включающие воздействие на глаза и кожу. Кроме того, необходимо учитывать потенциально уязвимые группы людей, такие как дети, пожилые люди и люди с заболеваниями кожи или глаз, а также влияние дальнего УФ-излучения при приеме фотосенсибилизирующих лекарств. На данную тему есть исследования [24, 25], однако они далеки от окончательных заключений о безопасности излучения 222 нм для человека.

### Генерация озона эксимерной KrCl-лампой

В спектре KrCl-лампы присутствует небольшое количество излучения с длиной волны менее 200 нм (рисунок), которое может генерировать озон, вклад основной длины волны 222 нм в генерацию озона будет незначительным. При использовании дополнительных полосовых оптических фильтров общая генерация озона будет незначительна. Другими источниками озона могут быть импульсные микроразряды, возникающие между внешним электродом в виде металлической проволоочной сетки и поверхностью кварцевой колбы в зазорах порядка 100 мкм и более. Количество генерируемого озона будет определяться размерами и количеством зазоров,

амплитудой напряжения и мощностью лампы [8, 9, 26]. Некоторые производители преодолели эту проблему, используя сложную и дорогую технологию – печать электродов непосредственно на кварце для устранения зазоров.

В [8, 9, 26] были приведены оценки генерации озона в помещении коммерческими импульсными эксимерными KrCl-лампами с длиной волны 222 нм. Для маломощного устройства с модулем Ushio Care 222 B1 с мощностью 12 Вт генерация озона составляет 0,012 мг/ч. В модуль входит четыре эксимерные KrCl-лампы с кварцевым окном с полосовым фильтром, выделяющим только УФ-222 нм. В помещении объемом 30 м<sup>2</sup> за 24 часа при непрерывной работе модуля концентрация озона достигает 0,009 мг/м<sup>3</sup>, которая не ощущается органами чувств и значительно ниже предельно допустимой концентрации озона в атмосферном воздухе населенных мест составляет 0,03 мг/м<sup>3</sup>. Однако KrCl-лампа мощностью 70 Вт с наружной проволочной сеткой производила озон со скоростью 12 мг/ч, что привело бы к повышению концентрации до 0,36 мг/м<sup>3</sup> в помещении объемом 30 м<sup>3</sup> в течение одного часа, что существенно превышает предельно допустимые концентрации. Основная причина высокой скорости генерации озона кроется в конструкции внешней проволочной сетки. Следовательно, KrCl-лампы могут производить опасные концентрации озона в помещениях без соответствующей вентиляции.

### Заключение

В настоящее время заявляемое основное преимущество применения УФ-222 нм от эксимерной KrCl-лампа, связанное с возможностью проводить обеззараживание воздуха и поверхностей в присутствии человека, проходит активную проверку, но далеко от окончательного заключения. Исследования показывают противоречивые результаты о безопасности такого излучения, как для кожи, так и для глаз млекопитающих. Установлено, что воздействие на ткани есть, но пока не доказано, что оно безопасно. Вопросы о безопасности при хроническом воздействии исследованы мало. Не рассматривались проблемы влияния УФ-излучения 222 нм на потен-

циально уязвимые группы людей, такие как медицинские работники, дети, пожилые люди и люди с заболеваниями кожи или глаз.

Бактериологическая эффективность УФ-излучения 222 нм не имеет никаких преимуществ перед УФ-излучением 254 нм ртутных и амальгамных ламп. Если в области обеззараживания воздушно-капельных вирусных систем и простых бактериологических штаммов оба типа ультрафиолета проводят инактивацию при аналогичных дозах, то при обработке более крупных объектов (эндоспоры, грибы, гифы грибов) существенное преимущество имеет ультрафиолет с длиной волны 254 нм. Поскольку микроорганизмы в воздухе находятся в аэрозолях с белковой составляющей, а на поверхности часто покрыты белковыми слоями, то излучение 222 нм будет поглощаться значительно сильнее, чем 254 нм, что значительно снижает инактивирующий эффект УФ-222 нм, в результате чего при практических применениях потребуются УФ-дозы в несколько раз превышающие лабораторные, следовательно, не будет преимущества по сравнению с УФ-254 нм.

Оборудование с эксимерными KrCl-лампами заметно уступает оборудованию с ртутными и амальгамными лампами низкого давления по энергопотреблению, эффективности, ресурсу и стоимости.

В зависимости от конструкции, мощности и времени работы KrCl-лампы могут приводить к образованию существенных концентраций озона в воздухе, что также является негативным фактором.

KrCl-лампы могут применяться в специальных условиях с обязательным отсутствием людей при обеззараживании.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильяк Л. М.* / Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 1. С. 5–17.
2. *Barnard I. R. M., Eadie E., Wood K.* / Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine. 2020. Vol. 36. № 6. P. 476–477. doi: 10.1111/phpp.12580
3. *Buonanno M., Ponnaiya B., Welch D., Stanislavskas M., Randers-Pehrson G., Smilenov L., Brenner D. J.* / Radiation Research. 2017. Vol. 187 (4). P. 493–501. doi: 10.1667/rr0010cc.1
4. *Yamano N., Kunisada M., Kaidzu S., Sugihara K., Nishiaki-Sawada A., Ohashi H., Nishigori C.* / Photochemistry and Photobiology. 2020. Vol. 96 (4). P. 853–862. doi: 10.1111/php.13269

5. *Buonanno M., Welch D., Shuryak I., Brenner D. J.* / *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10 (1). P. 10285. doi: 10.1038/s41598-020-67211-2
6. *Соснин Э., Тарасенко В.* / *Фотоника*. 2015. № 1/49/. С. 60–69.
7. *Ломаев М. В., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф., Шитц Д. В., Ерофеев М. В.* / *Успехи физических наук*. 2003. Т. 173 (2). С. 201–217.
8. *Соснин Э. А., Скакун В. С., Панарин В. А., Авдеев С. М., Сорокин Д. А.* / *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 10. С. 50–58.
9. *Соснин Э. А., Жданова О. С.* / *Квантовая электроника*. 2020. Т. 50. № 10. С. 984–988.
10. <https://uv-can.com/collections/far-uv-222nm-disinfection-components/products/helios-far-uv-222nm-excimer-lamp> (дата обращения: 01.08.2025).
11. *Blatchley III E. R., Brenner D. J., Claus H., Cowan T. E., Linden K. G., Liu Y., Ted Mao, Sung-Jin Park, Piper P. J., Simons R. M., Sliney D. H.* / *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2022. Vol. 53 (6). P. 733–753. doi: 10.1080/10643389.2022.2084315
12. *Welch D., Buonanno M., Grilj V., Shuryak I., Crickmore C., Bigelow A. W., Randers-Pehrson G., Johnson G. W., Brenner D. J.* / *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8 (1). P. 2752. doi: 10.1038/s41598-018-21058-w
13. *Setlow J.* The molecular basis of biological effects of ultraviolet radiation and photoreactivation. In *Current topics in radiation research*, M, E.; A, H., Eds. Vol. II. – Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1966. P. 195–248.
14. *Buonanno M., Stanislauskas M., Ponnaiya B., Bigelow A. W., Randers-Pehrson G., Xu Y., Brenner D. J.* / *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11 (6). P. e0138418. doi: 10.1371/journal
15. *Narita K., Asano K., Morimoto Y., Igarashi T., Nakane A.* / *PLoS ONE*. 2018. Vol. 13 (7). P. e0201259. doi: 10.1371/journal.pone.0201259.
16. *Hessling M., Haag R., Sieber N., Vatter P.* / *GMS Hyg Infect Control*. 2021. Vol. 16. P. Doc07. doi: 10.3205/dgkh000378
17. *Narita K., Asano K., Naito K., Ohashi H., Sasaki M., Morimoto Y., Igarashi T., Nakane A.* / *J Hosp Infect*. 2020. Vol. 105. № 3. P. 459–467. doi: 10.1016/j.jhin.2020.03.030
18. *Ohashi H., Koi T., Igarashi T.* / *Journal of Science and Technology in Lighting*. 2020. Vol. 44. P. 9–11. doi: 10.2150/jstl.IEIJ20A000006
19. *Zwicker P., Schleusener J., Lohan S. B., Busch L., Sicher C., Einfeldt S., Kneissl M., Kuhl A. A., Keck C. M., Witzel C., Kramer A., Meinke M. C.* / *Sci Rep*. 2022. Vol. 12. № 1. P. 2587. doi: 10.1038/s41598-022-06397-z
20. *Buonanno M., Welch D., Brenner D. J.* / *Photochemistry and Photobiology*. 2021. Vol. 97 (3). P. 517–523. doi: 10.1111/php.13383
21. *Woods J. A., Evans A., Forbes P. D., Coates P. J., Gardner J., Valentine R. M., Moseley H.* / *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*. 2015. Vol. 31 (3). P. 159–166. doi: 10.1111/phpp.12156
22. *Tavares R. S. N., Adamoski D., Girasole A. et al.* / *J Photochem Photobiol B*. 2023. Vol. 243. P. 112713. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2023.112713
23. *Kaidzu S., Sugihara K., Sasaki M., Nishiaki A., Ohashi H., Igarashi T., Tanito M.* / *Photochemistry and Photobiology*. 2021. Vol. 97 (3). P. 505–516. doi: 10.1111/php.13419
24. *Sugihara K., Kaidzu S., Sasaki M. et al.* / *Photochem Photobiol*. 2023. Vol. 99 (3). P. 967–974. doi: 10.1111/php.13710
25. *Kousha O., O'Mahoney P., Hammond R., Wood K., Eadie E.* / *Photochem Photobiol*. 2024. Vol. 100. P. 137–145. doi: 10.1111/php.1380
26. *Claus H.* / *Photochemistry and Photobiology*. 2021. Vol. 97 (3). P. 471–476. doi: 10.1111/php.13391

PACS: 87.50; 92.60.Sz

## Application of UV radiation 222 nm of excimer KCl lamps for disinfection

L. M. Vasilyak<sup>1,\*</sup>, N. N. Kudryavtsev<sup>2</sup>, S. V. Kostyuchenko<sup>3</sup>, D. O. Sivin<sup>3</sup> and I. S. Timofeev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia*

\* E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

<sup>2</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia*

<sup>3</sup> *NPO "LIT", Moscow Region, Dolgoprudny, 141701, Russia*

Received 16.06.2025; revised 15.08.2025; accepted 20.10.2025

**The prospects of using UV radiation from 222 nm excimer KrCl lamps for disinfection of air and surfaces are analyzed. The alleged main advantages of 222 nm radiation, which include the ability to disinfect in the presence of humans, and a higher bactericidal efficacy compared to the wavelength of 254 nm, are being tested experimentally. Studies show conflicting results about the safety of such radiation for the skin and for the eyes of mammals. It has been established that there is an effect on tissues, but it has not yet been proven that it is safe with pro-**

***longed multiple exposures. Inactivation of viruses and simple bacteriological strains by UV radiation of 222 nm and 254 nm is achieved at similar UV doses, however, UV radiation of 254 nm has a significant advantage for larger objects (endospores, fungi, fungal hyphae). The efficiency of 222 nm UV radiation generation in industrial KrCl lamps is 3–5 %, which is significantly less than for low-pressure mercury and amalgam lamps 30–35 %.***

*Keywords:* air; disinfection; UV radiation; 222 nm.

## REFERENCES

1. Vasilyak L. M., Plasma Phys Rep. **47**, 318 (2021).
2. Barnard I. R. M., Eadie E. and Wood K., Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine **36** (6), 476–477 (2020). doi: 10.1111/phpp.12580
3. Buonanno M., Ponnaiya B., Welch D., Stanislauskas M., Randers-Pehrson G., Smilenov L. and Brenner D. J., Radiation Research **187** (4), 493–501 (2017). doi: 10.1667/rr0010cc.1
4. Yamano N., Kunisada M., Kaidzu S., Sugihara K., Nishiaki-Sawada A., Ohashi H. and Nishigori C., Photochemistry and Photobiology **96** (4), 853–862 (2020). doi: 10.1111/php.13269
5. Buonanno M., Welch D., Shuryak I. and Brenner D. J., Sci. Rep. **10** (1), 10285 (2020). doi: 10.1038/s41598-020-67211-2
6. Sosnin E. and Tarasenko V., Photonics, № 1/49/, 60–69 (2015).
7. Lomaev M. I., Skakun V. S., Sosnin E. A., Tarasenko V. F., Shitts D. V. and Erofeev M. V., Phys. Usp. **46**, 193–209 (2003).
8. Sosnin E. A., Skakun V. S., Panarin V. A., Avdeev S. M. and Sorokin D. A., Journal of Optical Technology **88** (10), 587–592 (2021).
9. Sosnin E. A. and Zhdanova O. S., Quantum Electronics **50** (10), 984–988 (2020).
10. <https://uv-can.com/collections/far-uv-222nm-disinfection-components/products/helios-far-uv-222nm-excimer-lamp> (accessed July 05, 2025).
11. Blatchley III E. R., Brenner D. J., Claus H., Cowan T. E., Linden K. G., Liu Y., Ted Mao, Sung-Jin Park, Piper P. J., Simons R. M. and Sliney D. H., Critical Reviews in Environmental Science and Technology **53** (6), 733–753 (2022). doi: 10.1080/10643389.2022.2084315
12. Welch D., Buonanno M., Grilj V., Shuryak I., Crickmore C., Bigelow A. W., Randers-Pehrson G., Johnson G. W. and Brenner D. J., Scientific Reports **8** (1), 2752 (2018). doi: 10.1038/s41598-018-21058-w
13. Setlow J. The molecular basis of biological effects of ultraviolet radiation and photoreactivation. In Current topics in radiation research, M. E.; A. H., Eds. North Holland Publishing Company: Amsterdam, 1966. Vol. II. P. 195–248.
14. Buonanno M., Stanislauskas M., Ponnaiya B., Bigelow A. W., Randers-Pehrson G., Xu Y. and Brenner D. J., PLoS ONE **11** (6), e0138418 (2016). doi: 10.1371/journal
15. Narita K., Asano K., Morimoto Y., Igarashi T. and Nakane A., PLoS ONE **13** (7), e0201259 (2018). doi: 10.1371/journal.pone.0201259
16. Hessling M., Haag R., Sieber N. and Vatter P., GMS Hyg Infect Control **16**, Doc07 (2021). doi: 10.3205/dgkh000378
17. Narita K., Asano K., Naito K., Ohashi H., Sasaki M., Morimoto Y., Igarashi T. and Nakane A., J. Hosp Infect. **105** (3), 459–467 (2020). doi: 10.1016/j.jhin.2020.03.030
18. Ohashi H., Koi T. and Igarashi T., Journal of Science and Technology in Lighting **44**, 9–11 (2020). doi: 10.2150/jstl.IEIJ20A000006
19. Zwicker P., Schleusener J., Lohan S. B., Busch L., Sicher C., Einfeldt S., Kneissl M., Kuhl A. A., Keck C. M., Witzel C., Kramer A. and Meinke M. C., Sci Rep. **12** (1), 2587 (2022). doi: 10.1038/s41598-022-06397-z
20. Buonanno M., Welch D. and Brenner D. J., Photochemistry and Photobiology **97** (3), 517–523 (2021). doi: 10.1111/php.13383
21. Woods J. A., Evans A., Forbes P. D., Coates P. J., Gardner J., Valentine R. M. and Moseley H., Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine **31** (3), 159–166 (2015). doi: 10.1111/phpp.12156
22. Tavares R. S. N., Adamoski D., Girasole A. et al., J. Photochem Photobiol B. **243**, 112713 (2023). doi: 10.1016/j.jphotobiol.2023.112713
23. Kaidzu S., Sugihara K., Sasaki M., Nishiaki A., Ohashi H., Igarashi T. and Tanito M., Photochemistry and Photobiology **97** (3), 505–516 (2021). doi: 10.1111/php.13419
24. Sugihara K., Kaidzu S., Sasaki M. et al., Photochem Photobiol. **99** (3), 967–974 (2023). doi: 10.1111/php.13710

25. Kousha O., O'Mahoney P., Hammond R., Wood K. and Eadie E., Photochem Photobiol. **100**, 137–145 (2024). doi: 10.1111/php.1380
26. Claus H., Photochemistry and Photobiology **97** (3), 471–476 (2021). doi: 10.1111/php.13391

#### Об авторах

**Василяк Леонид Михайлович**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2). E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru SPIN-код: 5623-5167, AuthorID: 19599, ORCID 0000-0001-6982-3038, Scopus 7004886755

**Кудрявцев Николай Николаевич**, президент, академик, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9). AuthorID: 19586, Scopus 7006127196

**Костюченко Сергей Владимирович**, к.ф.-м.н., заместитель генерального директора по науке, НПО «ЛИТ» (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Лихачевский проезд, 25). E-mail: lit@lit-uv.ru AuthorID: 19597, ORCID 0009-0005-7450-8741

**Сивин Денис Олегович**, к.т.н., заведующий лабораторией, НПО «ЛИТ» (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Лихачевский проезд, 25). E-mail: light@lit-uv.ru AuthorID: 139704, ORCID 0000-0002-6341-6180, Scopus 8351574400

**Тимофеев Иван Сергеевич**, к.ф.-м.н., технический директор Департамента разработки оборудования, НПО «ЛИТ» (141701, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Лихачевский проезд, 25). E-mail: timofeev@lit-uv.ru SPIN-код: 6932-1594, AuthorID: 839789