

Особенности применения импульсных ксеноновых УФ-облучателей для обеззараживания воздуха и помещений

Л. М. Василяк, Н. Н. Кудрявцев

Анализ технологий УФ-обеззараживания воздуха и помещений показал, что происходит переход к УФ-облучателям с высокой средней мощностью (1–2 кВт). Эффективность обеззараживания импульсным ксеноновым источником полностью определяется классическим механизмом обеззараживания и полученной УФ-дозой. В качестве базового значения рекомендуется принять дозу 25 мДж/см².

Ключевые слова: УФ-излучение, обеззараживание, воздух, импульсные ксеноновые лампы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-2-50-55

Применение УФ-излучения для обеззараживания показало свою высокую эффективность в течение столетия [1–4], поэтому этот метод постоянно совершенствуется, а также исследуются условия, в которых необходимы те или иные УФ-дозы для различных микроорганизмов. Применение классических химических дезинфектантов сопровождается высокими рисками, обусловленными «человеческим» фактором, дополнительной химической нагрузкой на людей, большим временем высыхания поверхности [5]. Физический метод обеззараживания УФ-излучением связан с необратимыми изменениями в биологических структурах клеток бактерий и вирионов вирусов. Достаточно длительное время для обеззараживания воздуха и поверхностей использовались маломощные УФ-облучатели и рециркуляторы, которые обеспечивали рекомен-

дуемую УФ-дозу 6,6 мДж/см² для излучения с длиной волны 254 нм, необходимую для инактивации *Staphylococcus aureus* на 99,9 % [6]. Однако, как показала практика, для обеззараживания помещений медицинских организаций и помещений с массовыми скоплениями людей необходимо применять более высокие УФ-дозы. В последние годы в индустриально развитых странах видна тенденция повышения нормативных УФ-доз для обеззараживания воздуха и поверхности. Эта ситуация в чем-то похожа на эволюцию метода УФ-обеззараживания питьевой воды [2], когда сначала была принята нормативная УФ-доза 8 мДж/см², а затем по мере обнаружения новых патогенов и повышения степени обеззараживания УФ-доза возросла до 16 мДж/см², затем до 25 и даже до 40 мДж/см² для некоторых типов поверхностных вод. На сегодняшний день применение высоких УФ-доз для обеззараживания питьевой воды ни у кого не вызывает сомнения. Ведущие мировые институты и уполномоченные сертификационные центры, такие как ONORM, DWGW, USEPA и т. д., жестко определили требования и условия применения, сертификации и аттестации оборудования для различных технологических задач обеззараживания воды.

При обеззараживании воздуха и поверхностей, особенно в медицинских организациях, необходимо учитывать, что существуют и

Василяк Леонид Михайлович¹, гл.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Кудрявцев Николай Николаевич², президент МФТИ, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН.

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 08 апреля 2022 г.

© Василяк Л. М., Кудрявцев Н. Н., 2022

другие патогенные микроорганизмы, гораздо более устойчивые к воздействию УФ-излучения, чем *Staphylococcus aureus*. Актуальной проблемой являются и патогены, устойчивые к лекарствам и химическим дезинфектантам, так называемые «супербактерии», например, штамм золотистого стафилококка MRSA, устойчивый к метициллину, штамм энтерококка VRE, устойчивый к ванкомицину. В США инфекциями, связанными с оказанием медицинской помощи (ИСМП), ежегодно заболевают 1,7 миллиона пациентов, из которых 98 тысяч умирают (один из 17) [7], в Европе ИСМП поражаются примерно 7 % пациентов, т. е. около 4 миллионов человек [8]. Финансовые потери оцениваются в 7 миллиардов евро для Европы [8] и около \$28,4 миллиардов для США [9].

Появление новых возбудителей зачастую также требует увеличения УФ-дозы. Например, для инактивации на 99,9 % коронавируса SARS-CoV-2, вызвавшего пандемию COVID-19, Международная ультрафиолетовая ассоциация IUVA рекомендует УФ-дозу 20 мДж/см² [10], в России рекомендована УФ-доза 25 мДж/см² [11]. При этом необходимо понимать и учитывать, что ИСМП остаются одной из основных проблем, так как пациенты, болеющие или перенесшие коронавирус, более восприимчивы к таким инфекциям.

Для спор грибов УФ-дозы на порядок и более превышают УФ-дозы для инактивации большинства микробов [1, 2, 6], поэтому стандартная доза 6,6 мДж/см² для степени обеззараживания на три порядка по золотистому стафилококку не обеспечит инактивацию спор грибов даже на порядок.

Естественно, что при увеличении УФ-дозы необходимо увеличивать мощность УФ-облучателей. Еще один важный для практики фактор, который вынуждает применять мощное УФ-оборудование, это необходимость сокращения длительности процесса обеззараживания, желательна до 5–10 минут, для уменьшения времени использования помещения не по назначению.

В настоящее время ведущие мировые производители стали проектировать и предлагать открытые УФ-облучатели на ртутных и амальгамных лампах с длиной волны 254 нм

мощностью до 1–3 кВт с указанием УФ-облученности на определенном расстоянии (обычно 1 м), время обработки большинства помещений составляет 3–10 минут. Облучатели с такой средней электрической мощностью способны уменьшить большинство патогенов на 5–6 порядков, что необходимо для специальных медицинских помещений. Такие сложные облучатели обычно снабжены системами дистанционного включения и контроля и даже портативным компьютером.

Одним из вариантов развития высокомогущных УФ-облучателей стало применение большого числа маломощных ртутных ламп низкого давления (до 32 ламп в одном аппарате). Примерами таких облучателей может служить оборудование компаний Tru-D SmartUVC (США), Steris (США), Darlek UV Clean (Великобритания), Finsen Tech (Великобритания), UVD Robots (Дания), UVC Solutions (Словения). Данное решение позволяет обеспечить достаточно высокую облученность, но снижает эффективность использования УФ-ламп, так как часть УФ-излучения поглощается конструктивными элементами прибора и колбами других ламп. Проведение регламентных работ также затрудняется из-за большого числа ламп.

Гораздо эффективнее использовать небольшое количество (до 4 шт.) высокомогущных УФ-ламп. Такими лампами являются амальгамные лампы с мощностью 300–900 Вт, излучающие на длине волны 254 нм с высокой эффективностью 30–35 % преобразования электрической энергии в бактерицидное УФ-излучение и ресурсом 8–16 тысяч часов. Примером такого оборудования могут служить УФ-облучатели «СВЕТОЛИТ-600» фирмы «ЛИТ» (Россия) [12] с электрической мощностью 2 кВт, в которых используются 4 амальгамных лампы, облучатели «Helios» фирмы Surfacide (США) [13] с 4 амальгамными лампами.

Можно ожидать, что применяемые в облучателях УФ-лампы будут совершенствоваться по увеличению мощности и по увеличению ресурса по количеству циклов включений-выключений, так как кратковременный режим работы не является типичным для большинства промышленных мощных ламп.

Следует еще раз подчеркнуть, что во всем мире происходит увеличение УФ-доз за счет увеличения средней мощности источников УФ-излучения, а не за счет увеличения времени воздействия. В связи с этим уместно еще раз рассмотреть метод обеззараживания сплошным УФ-излучением импульсных ксеноновых ламп. Производители этого оборудования в России [14] сравнивают высокую импульсную мощность со средней мощностью ртутной УФ-лампы, а также указывают нереально высокую эффективность обеззараживания, даже что импульсный метод будет эффективен до расстояний 20–30 м. В данном случае происходит подмена понятий импульсной мощности, средней мощности и потока УФ-излучения.

Первооткрыватель механизмов обеззараживания импульсным УФ-излучением А. Wekhof [15, 16] четко указал, что обеззараживание импульсным ультрафиолетовым излучением высокой мощности может проходить двумя разными механизмами:

1. Классический механизм воздействия УФ-излучением С диапазона 200–300 нм, который зависит от УФ-дозы;

2. Разрыв клеток вследствие перегрева, вызванного поглощением УФ-излучения всех трех УФ-диапазонов А, В и С.

Он также обнаружил, что второй механизм (перегрев, приводящий к разрыву клеток) работает только при высоких значениях облученности (свыше 5 кВт/см^2). Зная излучательные характеристики УФ-лампы, можно достаточно просто рассчитать облученность на определенном расстоянии. Для импульсных УФ-ламп, используемых в промышленно изготавливаемых УФ-облучателях, эффективное расстояние для механизма перегрева ограничено несколькими десятками сантиметров, а на расстояниях свыше 50 см работает исключительно классический механизм воздействия УФ-С диапазона. В работах других исследователей [17, 18] также показано, что тепловое разрушение наблюдается только на малых расстояниях (10–20 см).

В последующих работах А. Wekhof указал, что метод импульсного обеззараживания на порядок дороже как по базовому оборудованию, так и по эксплуатации по сравнению с быстрым обеззараживанием ртутными УФ-лампами [19].

При обеззараживании помещений расстояния до обрабатываемых поверхностей составляют зачастую более 2 м, поэтому импульсный ксеноновый облучатель будет работать по классическому механизму, в котором эффективность обеззараживания зависит только от УФ-дозы. В США было проведено сравнительное тестирование оборудования «Хепех» с импульсными ксеноновыми лампами и оборудования «Тгу-D» с ртутными лампами [20]. Эффективность обеззараживания на расстоянии 1,2 м импульсного облучателя с ксеноновыми лампами оказалась ниже и определялась УФ-дозой, а не импульсной мощностью.

На сайте производителя импульсных облучателей с ксеноновыми лампами фирмы «Мелитта» [14] для облучателя «Альфа-06» с электрической мощностью 1,5 кВт и средней электрической мощностью лампы 1 кВт для обеззараживания поверхностей на расстоянии 2 м указаны длительности обработки 5–7 минут (например, для вируса SARS-CoV-2 для степени обеззараживания 99,99 % необходимо время воздействия 4,5 минуты). По данным [14, 21] у этого облучателя средняя электрическая мощность лампы 1 кВт, которая обеспечивает поток УФ-излучения 42 Вт и облученность 1 Вт/м^2 на расстоянии 2 м. Получается, что лампа имеет очень маленький КПД преобразования потребляемой электрической энергии в УФ-излучение, всего 4,2 %, однако для импульсных ксеноновых ламп большинство производителей указывают более высокий поток УФ-излучения – 15 % и выше, а бактерицидную УФ-дозу, т. е. с учетом спектральной эффективности воздействия, примерно 11 %. Можно рассчитать, что за пять минут работы облучателя в эксперименте УФ-доза на расстоянии 2 м составит более 25 мДж/см^2 , что значительно выше УФ-доз, указанных в российском руководстве Р 3.5.1904-04 для обеззараживания на 99,9 % для *Staphylococcus aureus* – $6,6 \text{ мДж/м}^2$, для *Pseudomonas Aeruginosa* – $10,5 \text{ мДж/м}^2$. Эта УФ-доза также согласуется с рекомендациями IUVА и Минздрава РФ для вируса SARS-CoV-2. Таким образом, указанная эффективность обеззараживания импульсным ксеноновым источником полностью определяется классическим механизмом обеззараживания и полученной УФ-дозой.

КПД генерации УФ-излучения С-диапазона импульсной ксеноновой лампой в 3–5 раз меньше, чем ртутными и амальгамными лампами низкого давления с такой же средней электрической мощностью, следовательно, и УФ-доза будет во столько же раз меньше. При этом стоимость импульсных облучателей в несколько раз выше, а ресурс непрерывной работы до замены лампы в несколько раз меньше.

Актуальным вопросом для применения импульсных ксеноновых ламп является и образование озона, так как сплошной спектр их излучения уходит в область длин волн короче 200 нм. Современные амальгамные и ртутные УФ-лампы принципиально не могут генерировать озон за счет использования специального кварца. Поэтому при использовании импульсного УФ-излучения необходимо контролировать концентрацию озона в помещениях после обеззараживания, и в случае превышения ПДК обеспечивать удаление образовавшегося озона. Из материалов заключений и исследований, опубликованных на упомянутом сайте компании «Мелитта», следует, что при использовании облучателя «Альфа-06» или «Уапех-2» для достижения эффективного обеззараживания в отношении клинических штаммов бактерий, обладающих множественной лекарственной устойчивостью и устойчивостью к различным группам химических средств дезинфекции, и различных вирусов требуется такое время обеззараживания, которое приводит к концентрации озона в обрабатываемом помещении, превышающей ПДК рабочей зоны. Соответственно, после использования импульсного УФ-излучения необходимо снизить концентрацию озона в помещении до допустимого уровня. Классическим и единственным реально применимым способом является проветривание или уличным воздухом (что не допускается по современным нормативам для медицинских организаций), или воздухом из приточной вентиляции. И сразу возникает вопрос: зачем обеззараживать воздух в помещении, если он потом будет заменен воздухом неизвестного качества? Еще один важный фактор – это время, которое требуется для проветривания помещения, и это время будет намного больше, чем время облучения помещения.

Очень важным является вопрос сертификации УФ-облучателей. Ведущие производители уже стали указывать УФ-облученность на расстоянии 1 м или на нескольких расстояниях от облучателя. За рубежом обсуждаются вопросы сертификации оборудования с учетом области применений, методики измерений и сертификации, создания сертификационных центров. Для России эти вопросы также очень важны, поскольку характеристики большинства облучателей на рынке в России либо не указаны, либо достоверность приводимых данных ничем не подтверждена.

В заключение следует еще раз отметить:

1. Во всем мире происходит переход на УФ-облучатели с высокой средней мощностью (1–2 кВт), которые позволяют за короткое время (5–10 минут) обеспечивать высокую УФ-дозу и высокую степень обеззараживания по широкому спектру микроорганизмов.

2. С этой точки зрения, импульсные УФ-установки тоже имеют высокую среднюю мощность (1 кВт), что позволяет обеспечивать требуемые высокие дозы. Однако, поток УФ-излучения от импульсных облучателей в 3–5 раз меньше, чем у ртутных облучателей той же средней мощности, а стоимость в несколько раз выше. Видимо это и является основной причиной, по которой импульсные УФ-облучатели применяются крайне редко для обеззараживания помещений, авторам известно только 2 компании в мире, производящих такое оборудование.

3. При выборе любого типа УФ-облучателя необходимо руководствоваться принципом обеспечения эффективных УФ-доз, указанных в действующих нормативных документах, например, в Руководстве Р 3.5.1904-04. При этом выбирать УФ-дозу необходимо для самого устойчивого (резистентного) микроорганизма, который может встречаться в помещении, а не только для нормируемого золотистого стафилококка. В качестве базового значения можно принять дозу 25 мДж/см², которой достаточно для борьбы с широким спектром ИСМП и с коронавирусом SARS-CoV-2.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kowalski W. J.* Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. UVGI for Air and Surface Disinfection. – Springer-Verlag Heidelberg, 2009.
2. Ультрафиолетовые технологии в современном мире / под ред. Кармазинов Ф. В., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Храменков С. В. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012.
3. *Reed N. G.* // Public Health Rep. 2010. Vol. 125. P. 15.
4. *Васильяк Л. М.* // УПФ. 2018. Т. 6. № 1. С. 5.
5. *Memarzadeh F.* // Appl. Biosaf. 2021. Vol. 26. № 1. P. 52.
6. Hazard Communication for Disinfectants Used Against Viruses. Health Hazards and Protective Measures. Centers for Disease Control and Prevention, USA. <https://www.cdc.gov/niosh/topics/disinfectant/default.html> (дата обращения: 14.04.2022).
7. Руководство Р 3.5.1904-04 «Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях». Минздрав РФ. 2005.
8. *Haque M., Sartelli M., McKimm J., Abu Bakar M.* // Infection and drug resistance. 2018. Vol. 11. P. 2321.
9. *Jakab S.* Prevention of health-care-associated infections (HAI) and antimicrobial resistance (AMR) in Europe // V International Conference on Patient Safety, Healthcare Associated Infection and Antimicrobial Resistance. 2010.
10. <https://www.cdc.gov/policy/polaris/healthtopics/hai/index.html> (дата обращения: 14.04.2022).
11. IUVA COVID-19 FAQ. <https://iuva.org/iuva-covid-19-faq> (дата обращения: 14.04.2022).
12. Временные методические рекомендации. Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19). Версия 15 (22.02.2022). Минздрав РФ.
13. <https://www.lit-uv.ru/> (дата обращения: 14.04.2022).
14. <https://www.surfacide.com/> (дата обращения: 14.04.2022).
15. <https://melitta-uv.ru/> (дата обращения: 14.04.2022).
16. *Wekhof A.* // PDA J. of Pharmaceutical Science and Technology. 2000. Vol. 54. P. 264.
17. *Wekhof A., Trompeter F.-J., Franken O.* Pulsed UV Disintegration (PUVD): a new sterilization mechanism for packaging and broad medical-hospital applications // The First International Conference on Ultraviolet Technologies. June 14–16, 2001, Washington D.C., USA. P. 1.
18. *Gomez-Lopez V. M., Devlieghere F., Bonduelle V., Debevere J.* // Journal of Applied Microbiology. 2007. Vol. 99. P. 460.
19. *Cheigh Chan-Ick, Park Mi-Hyun, Chung Myong-Soo, Shin Jung-Kue, Park Young-Seo* // Food Control. 2012. Vol. 25. P. 654.
20. *Wekhof A.* Pulsed vs. Continuous UV for in-line Sterilization or Sanitation. Steribeam, White paper. 2013. <http://www.steribeam.com/info/Pulsed%20vs.%20Continuous%20UV%20for%20in-line%20Sanitation%20or%20Sterilization.pdf> (дата обращения: 14.04.2022).
21. *Nerandzic M. M., Thota P., Sankar T. C., Jencson A., Cadnum J. L., Ray A. J., Salata R. A., Watkins R. R., Donskey C. J.* // Infection Control and Hospital Epidemiology. 2015. Vol. 36. № 2. P. 192. doi: 10.1017/ice.2014.36
22. <https://melitta-uv.ru/media/articles/evaluation-of-pulsed-xenon-ultraviolet-irradiation-of-continuous-spectrum-for-efficacy-against-multi/> (дата обращения: 14.04.2022) [in Russian].

PACS: 87.50; 92.60.Sz

The specificity of the usage of pulsed xenon UV irradiators for disinfection of air and rooms

L. M. Vasilyak¹ and N. N. Kudryavtsev²

¹ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bld. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy Per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received April 08, 2022

Analysis of UV disinfection technologies of air and rooms showed that there is a tendency to UV irradiator with high average power (1–2 kW). The effectiveness of disinfection with a

pulsed xenon source is completely determined by the classical mechanism of disinfection and the resulting UV dose. As a base value, it is recommended to take a dose of 25 mJ/cm².

Keywords: UV radiation, disinfection, air, pulsed xenon lamp.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-2-50-55

REFERENCES

1. W. J. Kowalski, *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. UVGI for Air and Surface Disinfection*. (Springer-Verlag Heidelberg, 2009).
2. *Ultraviolet Technologies in the Contemporary World*. Ed. by F. V. Karmazinov, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, and S. V. Khramenkov (Izd. Intellect, Dolgoprudny, 2012) [in Russian].
3. N. G. Reed, *Public Health Rep.* **125**, 15 (2010).
4. L. M. Vasilyak, *Plasma Phys Rep+*. **47**, 318 (2021).
5. F. Memarzadeh, *Appl. Biosaf.* **26**, 52 (2021).
6. Hazard Communication for Disinfectants Used Against Viruses. Health Hazards and Protective Measures. Centers for Disease Control and Prevention, USA. <https://www.cdc.gov/niosh/topics/disinfectant/default.html> (accessed 10.04.2022).
7. Guideline R 3.5.1904-04. The use of ultraviolet germicidal radiation for indoor air disinfection. Ministry of Health of the Russian Federation. 2005 [in Russian].
8. M. Haque, M. Sartelli, J. McKimm, and M. Abu Bakar, *Infection and drug resistance*. **11** 2321 (2018).
9. S. Jakab, Prevention of health-care-associated infections (HAI) and antimicrobial resistance (AMR) in Europe. V International Conference on Patient Safety, Healthcare Associated Infection and Antimicrobial Resistance. 2010.
10. <https://www.cdc.gov/policy/polaris/healthtopics/hai/index.html> (accessed 13.04.2022).
11. IUVA COVID-19 FAQ. <https://iuva.org/iuva-covid-19-faq> (accessed 13.04.2022).
12. Temporary guidelines. Prevention, diagnosis and treatment of novel coronavirus infection (COVID-19). Version 15 (02/22/2022). Ministry of Health of the Russian Federation [in Russian].
13. <https://www.lit-uv.ru/> (accessed 10.04.2022).
14. <https://www.surfacide.com/> (accessed 10.04.2022).
15. <https://melitta-uv.ru/> (accessed 10.04.2022).
16. A. Wekhof, *PDA J. of Pharmaceutical Science and Technology* **54**, 264 (2000).
17. A. Wekhof, F.-J. Trompeter, and O. Franken. Pulsed UV Disintegration (PUVD): a new sterilization mechanism for packaging and broad medical-hospital applications // The First International Conference on Ultraviolet Technologies. June 14–16, 2001, Washington D.C., USA. pp. 1–15.
18. V. M. Gomez-Lopez, F. Devlieghere, V. Bonduelle, and J. Debevere, *Journal of Applied Microbiology* **99**, 460 (2007).
19. Chan-Ick Cheigh, Mi-Hyun Park, Myong-Soo Chung, Jung-Kue Shin, Young-Seo Park, *Food Control*. **25**, 654 (2012).
20. A. Wekhof, Pulsed vs. Continuous UV for in-line Sterilization or Sanitation. Steribeam, White paper. 2013. <http://www.steribeam.com/info/Pulsed%20vs.%20Continuous%20UV%20for%20in-line%20Sanitation%20or%20Sterilization.pdf> (accessed 13.04.2022).
21. M. M. Nerandzic, P. Thota, T. Sankar C, A. Jencson, J. L. Cadnum, A. J. Ray, R. A. Salata, R. R. Watkins, and C. J. Donskey, *Infection Control and Hospital Epidemiology* **36**, 192 (2015). doi: 10.1017/ice.2014.36
22. <https://melitta-uv.ru/media/articles/evaluation-of-pulsed-xenon-ultraviolet-irradiation-of-continuous-spectrum-for-efficacy-against-multi/> (accessed 13.04.2022) [in Russian].