

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП ДЛЯ БАКТЕРИЦИДНОЙ ОБРАБОТКИ

*Объединенный институт высоких температур РАН,
ул. Ижорская, 19, стр.2, г. Москва, 125412, Россия, vasilyak@yandex.ru*

Введение

Бактерицидная обработка воды, воздуха и поверхностей ультрафиолетовым (УФ) излучением – экологически безопасный, экономичный и удобный в эксплуатации метод, который сочетает в себе высокую эффективность обеззараживания и отсутствие вредного влияния на воздух и воду [1–3]. В качестве источников бактерицидного УФ излучения [1–4] обычно используется электрическая дуга в парах ртути. Лампы низкого давления имеют высокий КПД (35–50%) преобразования электрической энергии в УФ излучение с длиной волны 254 нм при погонной мощности разряда до 2–3 Вт/см. Лампы высокого давления имеют низкий КПД (10–15%) в области бактерицидного УФ, однако их мощность на порядок выше, чем ламп низкого давления. Существенным недостатком ртутных бактерицидных ламп является наличие металлической ртути. В ртутных лампах низкого давления содержится от 3 до 10 мг ртути, а в лампах высокого давления – сотни миллиграмм. Постоянное повышение требований по экологической безопасности и введение дополнительных ограничений на использование металлической ртути стимулировали разработки новых источников бактерицидного УФ излучения. В последнее время достигнуты серьезные успехи в разработке нового поколения УФ ламп низкого давления, в которых источником паров ртути служит амальгама. Основная масса ртути находится в связанном состоянии (амальгаме), а в свободном – только 0,03 мкг на лампу, поэтому давление паров ртути при температуре до 50° С ниже ПДК. Эти лампы существенно безопаснее, чем люминесцентные, используемые для освещения. Амальгамные лампы имеют высокий КПД (35–45%) и ресурс 12000–16000 часов.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке безртутных источников УФ излучения на основе импульсных разрядов в инертных газах и их смесях с галогенами (эксимерные смеси) [2–5], в спектре излучения которых содержится значительная доля УФ излучения. Поскольку пиковая мощность импульса излучения ксеноновой лампы может составлять 3–10 МВт, то возникает естественный вопрос, есть ли различия при бактерицидной обработке сред УФ излучением такой импульсной лампы и обычных ртутных ламп. Широкий спектр импульсного разряда ставит также вопрос – влияет ли на процесс обеззараживания импульсное излучение видимого диапазона. Исследования дезинфекции импульсным излучением показали, что при превышении импульсом излучения пороговой мощности, помимо «обычного» бактерицидного действия, может реализоваться еще дополнительный механизм воздействия УФ излучения на микроорганизмы – импульсный нагрев [6–9]. В данной статье проанализированы оба механизма, условия их возникновения и возможности импульсных систем при бактерицидной обработке.

Механизмы дезинфекции импульсным излучением

1. Бактерицидное УФ излучение. УФ излучение из бактерицидного диапазона 205–315 нм всегда производит бактерицидное действие, которое заключается в поглощении УФ фотонов молекулами ДНК внутри клетки, разрывом связей в молекуле ДНК и образованием новых связей, в результате чего микроорганизм теряет способность к воспроизведению. Кривая эффективности бактерицидного воздействия УФ излучения в зависимости от длины волны хорошо согласуется с кривой поглощения УФ излучения молекулами ДНК. Максимум этой кривой находится в области 265 нм [1–3], поэтому излучение ртутных ламп низкого давления с длиной волны 254 нм обладает высокой бактерицидной эффективностью. Число выживших микроорганизмов N экспоненциально падает с ростом полученной энергии (бактерицидной дозы D), $N = N_0 \exp(-kD)$, где N_0 – число начальных микроорганизмов, k – константа, характеризующая степень чувствительности данного вида микроорганизма к УФ облучению. Величина УФ дозы, необходимой для десятикратного уменьшения, зависит от вида микроорганизма и для многих бактерий и вирусов лежит в области 2–20 мДж/см² [1, 3]. Для большинства практических применений величина бактерицидной дозы D определяется не пиковым зна-

чением интенсивности излучения, а интегралом бактерицидной облученности $E(\lambda, t)$ по времени воздействия t [1–4]:

$$D = \iint E(\lambda, t) S(\lambda) d\lambda dt,$$

где λ – длина волны, $S(\lambda)$ – относительная бактерицидная эффективность в зависимости от длины волны. На рис. 1 показан пример определения бактерицидной эффективности импульсной ксеноновой лампы $S_\lambda I_\lambda$, а также приведены относительная спектральная кривая бактерицидного действия S_λ и распределение энергии излучения по спектру импульсной ксеноновой лампы в диапазоне 200–300 нм I_λ .

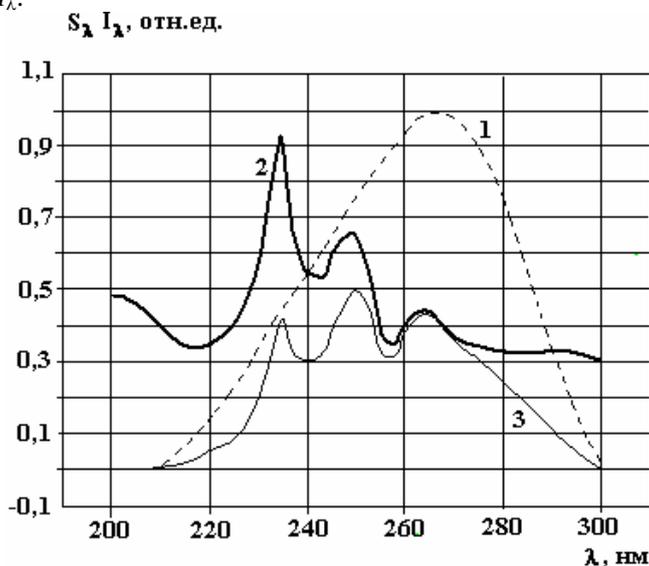


Рис. 1. Определение бактерицидной эффективности импульсной ксеноновой лампы $S_\lambda I_\lambda$. 1 – относительная спектральная кривая бактерицидного действия S_λ , 2 – распределение энергии излучения по спектру импульсной ксеноновой лампы в диапазоне 200–300 нм I_λ , 3 – произведение $S_\lambda I_\lambda$

2. Импульсный перегрев микроорганизмов. Вопрос об отличиях воздействия импульсного излучения по сравнению с непрерывным исследовался в США и Германии [6–14], в России [15, 16], Японии [17, 18], Иране [19], Канаде [20] и других странах. Первые исследования процесса дезинфекции мощными импульсными лампами были выполнены в Японии, и импульсная технология запатентована в 1984 году [17]. В ранних работах сделано предположение, что при мощном импульсном воздействии в процессе дезинфекции участвует не только УФ излучение, но и видимый свет. Однако через 15 лет было доказано, что в процесс обеззараживания импульсным излучением основной вклад вносят УФ фотоны [6–9].

К настоящему времени установлено, что импульсное излучение обладает бактерицидным действием и механизм его воздействия на микроорганизмы зависит от пиковой плотности мощности УФ излучения, причем для каждого вида микроорганизмов существует свое значение пороговой пиковой мощности. Согласно полученным данным [6, 7], механизм дезинфекции импульсным излучением имеет две составляющие: одна из них – общеизвестное воздействие бактерицидным УФ излучением, другая – разрушение микроорганизма в результате его перегрева при поглощении всего УФ излучения. При пиковой плотности мощности УФ излучения ниже пороговой обеззараживание определяется только УФ излучением бактерицидного диапазона 205–315 нм, и степень обеззараживания зависит от интегральной бактерицидной дозы согласно вышеприведенной формуле.

При высоких плотностях импульсного излучения, когда суммарная плотность мощности УФ излучения в спектральных диапазонах А, В, С (200–400 нм) выше пороговой, скорость подвода лучистой энергии превышает скорость сброса тепловой энергии микроорганизмом в окружающую среду, и происходит перегрев микроорганизма, приводящий к его дезинтеграции [7]. Экспериментально показано, что излучение в видимой области спектра не вносит существенного вклада в нагрев микроорганизмов. Уровень необходимой плотности мощности зависит от термостойкости облучаемых микроорганизмов и среды, их окружающей. Для стабильной дезинтеграции необходим нагрев до температуры более 130°C, при которой происходят необратимые изменения, вплоть до закипания жидкости внутри микроорганизма и выброса ее наружу. Пример такого разрушения представлен на рис. 2 при облучении спор плесени *Aspergillus Niger* двумя импульсами с пиковой плотностью УФ излучения

33 кВт/см² [7]. Хорошо видна разорванная пустая оболочка. Согласно расчетам [7], для импульсного нагрева до таких температур бактерий *e-coli* необходимо получать пиковую плотность мощности излучения на обрабатываемой поверхности в воздухе (10³ Вт/см²) и в воде (10⁴ Вт/см²) (рис. 3). Как следует из расчетов, нагрев начинает сказываться уже при значениях 10² Вт/см² в воздухе и 10³ Вт/см² в воде, поскольку для многих микроорганизмов нагрев до температуры 70°C является критическим. Перегрев зависит от свойств окружающей среды. Для воды мощности излучения должны быть выше, поскольку теплопередача от микроорганизма в воде выше, чем в воздухе. По этой же причине перегрев и дезинтеграция микроорганизмов на поверхности из воска или парафина выше, чем на металлической поверхности. Отметим, что при столь высоких плотностях импульсной энергии наблюдались оплавления поверхности парафина [6, 7].

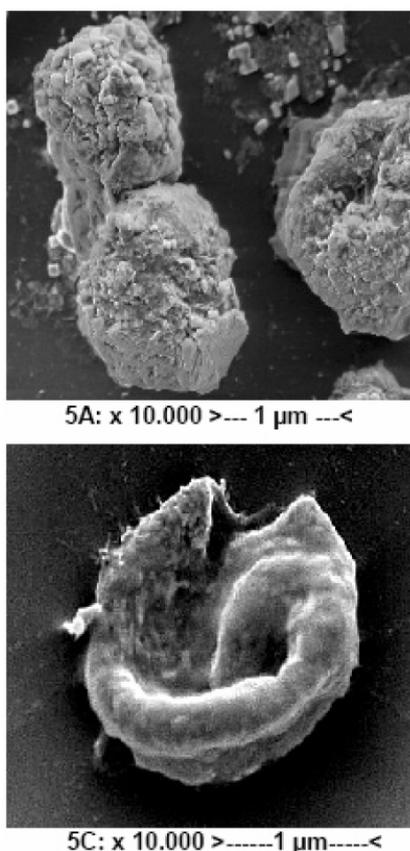


Рис. 2. Воздействие импульсного излучения на споры *Aspergillus Niger*. На фотографиях указан масштаб. 5А – исходные споры. 5С – одиночная спора *Aspergillus Niger* после воздействия 2 импульсов излучения с пиковой мощностью 33 кВт/см². Вершина споры разорвана перегретой внутриклеточной жидкостью, которая вылетела из споры наружу. Вокруг споры образуется кратер из вылетевших остатков [6, 7]

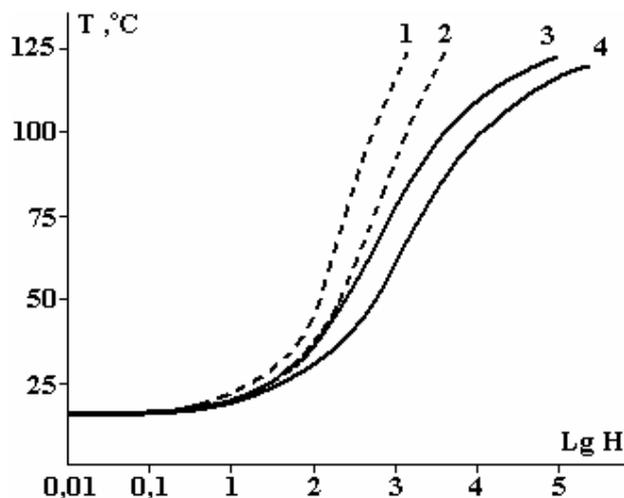


Рис. 3. Рассчитанные температуры нагрева для бактерии *e-coli* в зависимости от пиковой плотности мощности H (Вт/см²) УФ излучения в воздухе (1, 2) и в воде (3,4) для двух длительностей импульса: 100 (1 и 3) и 1 мс (2 и 4) [6, 7]

Еще раз отметим, что основной вклад в нагрев микроорганизмов дает УФ излучение, а не видимый свет или инфракрасное излучение. Скорее всего это связано с тем, что УФ излучение поглощается на меньшей глубине, чем видимое или инфракрасное, а также с тем, что при размерах мишени микрон и менее на процессы рассеяния и поглощения фотонов оказывает влияние волновая природа света, длинноволновые фотоны будут больше рассеиваться и огибать микрочастицу, чем УФ фотоны. Экспериментально показано, что импульсного перегрева и разрушения микроорганизмов можно достичь и при использовании только мягкого УФ излучения из областей А и В (280–400 нм), если его интенсивность выше пороговой, что позволяет обеспечить дезинфекцию без применения жесткого бактерицидного УФ излучения из области С (200–280 нм).

Кроме величины пиковой мощности необходимо обеспечить подвод энергии к мишени, достаточной для нагрева. Если импульс излучения очень короткий, например менее 1 мкс, то этого времени может не хватить для нагрева микроорганизма. Другими словами, для реализации перегревного механизма необходимо обеспечить и импульсную мощность излучения, чтобы подвод энергии был выше, чем сброс тепла от микроорганизма в окружающую среду, и поглощенную дозу энергии для того чтобы ее хватило для нагрева микроорганизма до высокой температуры. Так как воздействие этих температур кратковременно, их может оказаться недостаточно для дезинтеграции спор и некоторых видов бактерий, так же как при обычном нагреве необходимо определенное время воздействия для разрушения всех микроорганизмов данного типа.

Источники УФ излучения

Основными факторами, определяющими эффективность источников УФ излучения, являются: бактерицидная эффективность, бактерицидный поток лампы, ресурс, падение бактерицидного потока к концу срока службы лампы, компактность и стоимость блока запуска и питания (ПРА), безопасность и технологичность использования источника бактерицидного излучения.

Применение бактерицидных газоразрядных ламп, в которых основным излучающим элементом является атом ртути, обусловлено тем, что он имеет резонансный электронный переход с длиной волны излучения 253,7 нм, что близко к максимуму кривой бактерицидной чувствительности. В ртутных и амальгамных лампах низкого давления КПД преобразования вложенной в лампу электрической энергии в излучение на длине волны 253,7 нм достигает 35–50% [1–3], что составляет более 90% всего УФ излучения. В этих источниках давление инертного газа составляет 800–5000 Па, а давление паров ртути – 10–15 Па. Амальгамные лампы, благодаря троекратно повышенной погонной мощности УФ излучения по сравнению с ртутными лампами низкого давления позволяют эффективно решать задачи бактерицидной обработки воздуха, воды и поверхностей. Использование электронных компактных ПРА, работающих на частоте 20–50 кГц, позволило повысить КПД системы лампы-ПРА, увеличить срок службы лампы до 16000 часов и варьировать электрическую мощность лампы в процессе ее работы. Высокий бактерицидный КПД, удобство работы с ПРА, ресурс более 1000–16000 часов и относительная дешевизна привели к широкому использованию ртутных и амальгамных ламп низкого давления.

Дуговой разряд при высоком давлении паров ртути 10^3 – 10^5 Па имеет более низкий КПД в области бактерицидного УФ излучения – 15%, а с учетом кривой бактериальной эффективности это значение снижается до 10–11% [4]. Практически все промышленно выпускаемые бактерицидные ртутные лампы высокого давления излучают УФ излучение с длиной волны менее 200 нм, что приводит к наработке высокотоксичного озона. Ртутные лампы низкого давления изготавливают в основном из боросиликатного стекла или специальных сортов кварца, которые не пропускают коротковолновое излучение и исключают наработку озона, что выгодно отличает их от озonoобразующих ламп.

Основным заявляемым преимуществом импульсных ксеноновых ламп является большая пиковая мощность в импульсе, которая достигает 5–50 МВт при длительности импульса 1–200 мкс. Первоначально ксеноновые лампы были разработаны для накачки твердотельных лазеров, а затем стали применяться и для обеззараживания. Спектральный состав излучения зависит от плотности разрядного тока (рис. 4) [6, 7] и схемы включения лампы. На диапазон длин волн от 200 до 300 нм приходится 25–30% всего излучения в диапазоне 100–1100 нм и 40% на весь УФ диапазон. Соответственно бактерицидная эффективность составит 10–13% от суммарного излучения лампы. На рис. 1 приведена бактерицидная эффективность импульсной ксеноновой лампы. Полученный результат согласуется с данными для ксеноновых ламп типа ИНП-7/120 и ИФП-8000 [1, 3]. С учетом потерь на пропускание колбы лампы и тепловых потерь бактерицидная эффективность составит ~10% от вкладываемой в лампу электрической энергии. Широкий спектр излучения импульсных ксеноновых ламп скорее недостаток, чем преимущество, так как его коротковолновая часть может приводить к нежелательному образованию озона, к побочным химическим реакциям и наработке вредных для человека соединений. Для уменьшения интенсивности излучения в коротковолновой области спектра уменьшают плотность тока в лампе (рис. 4), пиковая мощность излучения при этом тоже уменьшается. Также используют дополнительные защитные пленки или специальные сорта кварца, однако это значительно увеличивает стоимость ламп и уменьшает ресурс из-за поглощения УФ излучения кварцевой колбой.

Срок службы импульсных ксеноновых ламп определяется числом вспышек, которые может обеспечить лампа. Чем выше энергия импульса, тем меньше число срабатываний лампы, которое варьируется от 10^3 до 10^8 импульсов. Средняя мощность лампы регулируется изменением частоты следования импульсов. При частоте вспышек 30 Гц и ресурсе 10^8 импульсов получаем время непре-

рывной работы лампы менее 1000 часов. При практическом применении импульсных ламп падение УФ излучения к концу срока службы составляет 25–50%.

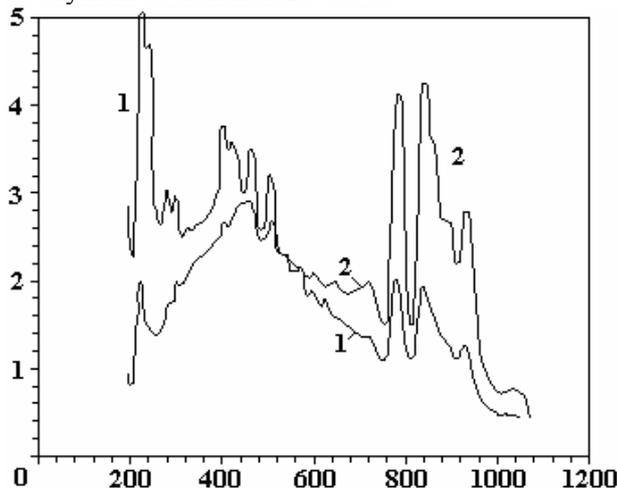


Рис. 4. Спектр излучения импульсной ксеноновой лампы при плотности тока 6,5 (1) и 1 кА/см² (2). [(Technical Bulletins and Catalogues on Flash lamps by Perkinelmers Opto-Electronics Corp. (former EG&G Corp.), 1989-1999. Address: 35 Congress Street, Salem, Ma, USA)]

Для зажигания импульсных ксеноновых ламп используют две основные электрические схемы, в которых в качестве накопителя энергии служат импульсные конденсаторы. В одной схеме импульсная лампа постоянно подключена к конденсатору и к лампе постоянно приложено рабочее высокое напряжение 1–5 кВ. Для получения разряда на лампу от специальной схемы подается высоковольтный импульс амплитудой 10–30 кВ, который инициирует электрический пробой. В другой схеме между накопительным конденсатором и лампой находится высоковольтный ключ, например искровой разрядник или тиратрон. Использование коммутатора увеличивает стоимость импульсного источника питания и уменьшает его ресурс. Применение мощной импульсной высоковольтной техники значительно увеличивает габариты и сложность источника питания для импульсных ламп и предъявляет повышенные требования по безопасности при работе с этим оборудованием.

Таким образом, импульсные источники УФ излучения характеризуются высокой (до 50 МВт) пиковой мощностью, бактерицидной эффективностью УФ излучения около 10%, сроком службы около 1 000 ч и громоздким высоковольтным источником питания. Лампы с высокой удельной нагрузкой, такие как ртутные лампы высокого давления и импульсные ксеноновые лампы, требуют интенсивного теплоотвода, что делает конструкцию оборудования на их основе более сложной по сравнению к оборудованию с ртутными или амальгамными лампами низкого давления.

Возможности импульсного УФ обеззараживания

1. При импульсной мощности в зоне обеззараживания ниже пороговой (1–3 кВт/см²) импульсные источники УФ излучения могут быть использованы аналогично обычным бактерицидным лампам. В этом случае бактерицидное воздействие зависит от доли УФ излучения бактерицидного диапазона, которая составляет около 25% от всего импульса излучения [2–4, 6] и около 40% от УФ излучения всех УФ диапазонов (А, В и С) [6]. Согласно действующим методическим указаниям, бактерицидный эффект УФ излучения определяется не пиковым значением интенсивности излучения, а интегралом бактерицидной облученности по времени воздействия в соответствии с приведенной формулой. Соответственно бактерицидная эффективность и бактерицидный КПД преобразования энергии импульсных ламп составят 10–13% от суммарного излучения лампы [4], что в несколько раз ниже, чем ртутных ламп низкого давления, и примерно соответствует ртутным лампам высокого давления. Тем не менее применение импульсных ламп может быть необходимым в специальных производствах и условиях, где не допускается наличие ртути, либо для повышения экологической безопасности.

При обеззараживании воздуха в помещении с помощью импульсной лампы с низкой частотой вспышек могут возникнуть проблемы. Воздух в помещениях перемешивается под действием вентиляции и конвекционных потоков с характерными скоростями движения воздуха не более 0,1–0,2 м/с в помещениях с людьми для их комфортного пребывания. Излучение одного импульсного источника эффективно обеззараживает воздух рядом с ним, однако вследствие сильного убывания интенсивности излучения с расстоянием оказывает малый эффект на удаленные области. Как следствие – сум-

марное время обработки должно быть достаточно большим для перемешивания воздуха в комнате и количество импульсов должно быть большим, что сводит на нет преимущества мощного импульсного источника. Отметим, что эффективность обеззараживания воздуха в помещении стационарными открытыми облучателями малой мощности доказана многолетней практикой [1, 3, 21] и установлены практически необходимые мощности непрерывного УФ излучения для большинства используемых помещений. При постоянном облучении вся вода или воздух получают некую среднюю дозу УФ излучения.

Аналогичная ситуация при низкой частоте вспышек может реализоваться и при обеззараживании воздуха или воды в проточном режиме, например в установках закрытого типа, где облучение производится в полностью закрытой камере, через которую проходит воздух или вода. Вследствие достаточно малого времени пребывания обрабатываемой среды в зоне облучения необходимо обеспечить достаточно высокую частоту вспышек для надежного обеззараживания проходящего воздуха или воды.

Итак, если плотность мощности УФ излучения меньше пороговой, то единственное преимущество импульсного источника – это возможность в течение очень короткого, по сравнению с ртутной лампой, промежутка времени произвести дезинфекцию, например медицинских материалов или упаковки [11–14, 22].

2. При плотности мощности УФ излучения выше пороговой ($1\text{--}3\text{ кВт/см}^2$) и при достаточной длительности импульса появляются дополнительные возможности обеззараживания, поскольку будут работать оба механизма, описанных выше. Эффективность обеззараживания может многократно возрасти. Импульсную термическую дезинфекцию или стерилизацию можно проводить по отношению к микроорганизмам, устойчивым к бактерицидному УФ излучению. Кроме этого появляется дополнительная возможность стерилизовать пищевые продукты, биологические растворы, медицинские материалы, контактные линзы или другие образцы только мягким УФ излучением из областей А и В [6, 7, 14], если жесткое бактерицидное излучение из области С не применимо из-за инициирования нежелательных химических реакций или повреждения образца, например медицинских препаратов или пищевых продуктов. Можно производить стерилизацию упаковочного материала и образцов внутри упаковки импульсным УФ излучением, проходящим через материал упаковки [5–8, 11, 13]. Есть исследования [15], в которых импульсное УФ излучение из областей А и В применялось в медицинских целях для лечения поверхностных ран и язв.

Однако при этом способе в условиях, отличающихся от тестовых испытаний, могут быть получены неудовлетворительные результаты. Термическая дезинтеграция микроорганизмов принципиально отличается от механизма воздействия бактерицидного УФ излучения на ДНК, поэтому эффективность обеззараживания, полученную опытным путем на малых расстояниях от импульсного источника, где интенсивность выше пороговой, нельзя экстраполировать и применять на больших расстояниях, поскольку интенсивность УФ излучения на единице площади уменьшается и механизм термической деструкции перестанет работать. Требуемые мощности излучения будут сильно занижены, а эффективность обеззараживания очень завышена. Например, пусть пиковая мощность УФ излучения равна 5 МВт, а длина лампы – 0,5 м. Если тестовые испытания проводить на расстоянии 10 см от оси лампы, то, принимая для оценки цилиндрический источник, получим пиковую плотность УФ излучения $1\text{--}2\text{ кВт/см}^2$, что достаточно для начала термической деструкции микроорганизмов в воздухе или на поверхности. На расстоянии 2 м источник приближается к точечному, поэтому плотность излучения падает обратно пропорционально квадрату расстояния и составит не более $20\text{--}50\text{ Вт/см}^2$, что существенно ниже пороговой, следовательно, термическая деструкция не работает. Если используется открытый облучатель для обеззараживания воздуха в помещении с расстоянием между стенами 4 м, то для реализации перегревного механизма импульсная мощность УФ излучения должна составлять $\sim 500\text{ МВт}$, что недостижимо для существующих импульсных ламп. Следовательно, реализовать перегревной механизм во всем объеме при обеззараживании помещений одиночными открытыми импульсными облучателями невозможно.

3. Работы по обеззараживанию воды и воздуха путем деструкции микроорганизмов при нагреве импульсным излучением находятся на стадии экспериментальных исследований, не разработана нормативная база по их применению, нет рекомендации и методики конструирования и применения промышленных установок, не определены минимальные значения пиковой плотности мощности излучения для дезинтеграции различных видов микроорганизмов и зависимость этих значений от условий внешней среды и длительности импульсов излучения, не выбраны типы микроорганизмов для надежной оценки качества оборудования.

Для практического применения метода импульсной термической дезинтеграции бактерий и спор необходим набор экспериментальных статистически достоверных данных о требуемых потоках мощности импульсного излучения для дезинтеграции каждого вида микроорганизмов и их зависимости от окружающей среды, скорости нарастания импульса мощности излучения и длительности воздействия импульса на микроорганизм. Из-за кратковременности воздействия перегрева его может оказаться недостаточно для дезинтеграции спор и некоторых видов бактерий. Необходимо провести испытания по каждому виду микроорганизмов. Сегодня такая база данных существует только для непрерывного УФ излучения на длине волны 254 нм. Проводить прямую аналогию доз, необходимых для обеззараживания ртутными и импульсными лампами, нельзя, поскольку дозы импульсного излучения могут отличаться от дуговых ртутных разрядов. Например, из приведенных в [23, 24] данных видно, что для некоторых микроорганизмов необходимые дозы импульсного УФ излучения могут быть как выше, так и ниже доз при непрерывном УФ облучении. Метод термической деструкции микроорганизмов импульсным УФ излучением требует дополнительных исследований для определения его возможностей на объектах с очень малыми размерами 100–300 нм, таких как вирусы, которые соизмеримы с длиной волны УФ излучения.

Примеры оборудования с импульсными лампами

В настоящее время во всех установках используют импульсные лампы с разрядом в инертном газе ксеноне. Установки для бактерицидной обработки с импульсными ксеноновыми лампами предлагают такие фирмы, как "LightStream" (США), "PurePulse Technologies, Inc." (США), "Xenon Corporation", "Steribeam" (Германия), "Мелитта" (Россия).

"LightStream" производит оборудование для обеззараживания воды с расходами 80–800 м³/час. Применяется одна ксеноновая лампа с импульсной мощностью 6 МВт с частотой следования импульсов 1–30 Гц. Средняя мощность УФ-С излучения 2400 Вт, потребляемая мощность 15 кВт, что эквивалентно КПД = 16%. Необходимая УФ доза определяется интегрированием по всему спектру и по времени действия импульса, причем импульсному излучению не приписывается никаких дополнительных преимуществ, в том числе и механизм импульсного перегрева. Естественно, что такие системы проигрывают ртутным лампам низкого давления по эффективности преобразования электроэнергии в УФ излучение, но не содержат ртути. Такой же подход к определению дозы бактерицидного УФ излучения и его эффективности принят и в оборудовании компании "Xenon Corporation".

Производимое "Steribeam" в Германии оборудование основано на эффекте деструкции при импульсном перегреве и представляет собой закрытые боксы. Оно предназначено для дезинфекции медицинских препаратов, растворов и инструментов, пищевых продуктов, упаковочных материалов и различных поверхностей для пищевой, медицинской, парфюмерной промышленности. Используются ксеноновые лампы вспышки с полной энергией 800 Дж, длительностью импульса 250 мкс, доля УФ излучения в С области (UVC) составляет 12–15%, UVB-10–12%, UVA-10–15%, доля всего УФ излучения – 40–42%. Полная доза на поверхности образца - 500-800 мДж/см², интенсивность УФ излучения на поверхности образца – 2–4 кВт/см². Поскольку в закрытых боксах образец находится на заранее определенном расстоянии от лампы, то интенсивность излучения и УФ доза на поверхности образца будут превышать пороговые значения, поэтому можно с уверенностью утверждать, что работают оба механизма обеззараживания. Оборудование не предназначено для обработки больших объемов или потоков жидкости и газа перегревным механизмом.

Открытые импульсные облучатели "Альфа-01" и "Альфа-05" компании "Мелитта-УФ" (Россия) предназначены для обеззараживания воздуха или поверхностей в помещениях. В этом случае плотность мощности импульсного излучения будет зависеть от размеров помещения, от расстояния до источника и места расположения источника. В паспорте установки "Альфа-01" указано, что частота следования импульсов – 2,5 Гц, потребляемая мощность – 2 кВт, производительность – 5000 м³/час, в предположении, что идет дезинфекция помещений с объемом 100 м³. Оценки показывают, что при пиковой мощности излучения установки "Альфа-01" 2–10 МВт в помещении объемом 60–100 м³ пиковая плотность мощности излучения во всем спектральном диапазоне на поверхности стен составляет 50–200 Вт/см², что ниже пороговой для реализации механизма термического разрушения, поэтому эффективность обеззараживания воздуха в таких помещениях будет зависеть только от полученной дозы бактерицидного УФ излучения. Эффективность обеззараживания будет зависеть от скорости перемешивания воздуха в помещении, как и в случае маломощной ртутной лампы. Проведем сравнение энергетических затрат импульсного и непрерывного источников. Для 99% обеззараживания помещения с объемом 100 м³ рекомендуемое время обработки установкой "Альфа-01" составляет 1,5 мин, что соответствует затратам электроэнергии 180 кДж. При использовании ртутных

ламп согласно РД [1] для 99% дезинфекции воздуха необходимо затратить в УФ диапазоне 260 Дж/м³ или 26 кДж для помещения 100 м³, что существенно меньше, чем энергетические затраты "Альфа-01". Для достижения того же эффекта при использовании ртутных ламп низкого давления в течение того же времени их УФ мощность будет составлять ~300 Вт, и при 30–40% эффективности работы ртутных УФ ламп их полная мощность составит менее 1 кВт.

Таким образом, применение импульсных ламп для бактерицидной обработки открытых помещений, воздуха или воды не имеет преимуществ по сравнению с традиционными ртутными лампами низкого давления. Не рекомендуется применять импульсные источники с низкой частотой следования для обеззараживания воздуха в помещениях и потоков воды или воздуха, поскольку невозможно обеспечить бактерицидную дозу во всем обработанном объеме.

Эксплуатация импульсных систем обеззараживания

Энергетические затраты при импульсном методе обеззараживания воды и воздуха сравнимы и даже выше, чем при использовании ртутных ламп низкого давления. На практике следует учитывать потери в системах импульсного питания, например в блоке питания лампы L7684 японской фирмы Hamamatsu потери составляют 50% от средней мощности лампы. Еще одним существенным недостатком данного метода является очень высокая стоимость оборудования. При одинаковом энергопотреблении (2 кВт) оборудование для импульсной стерилизации фирмы «Мелитта» стоит 12 000 евро, "Steribeam" – 88 000 евро, а стоимость оборудования с использованием амальгамных ламп низкого давления с той же потребляемой мощностью не превышает 1100 EURO. Ресурс импульсных ксеноновых ламп, импульсных конденсаторов и разрядников зависит от параметров разряда и составляет 10⁵–10⁸ импульсов или около 100–1000 часов непрерывной работы, а для технологических применений ресурс должен составлять 8000–10000 час. Оборудование с источниками импульсного УФ излучения пока не может конкурировать по энергетическим и финансовым затратам с традиционными ртутными лампами низкого давления в системах обеззараживания воды и воздуха в больших объемах. Однако для бактерицидной обработки материалов и упаковки мягким УФ излучением, а также в системах, где не допускается использование приборов, содержащих ртуть, ксеноновые лампы являются, по-видимому, наиболее приемлемым вариантом.

Применение мощной высоковольтной импульсной техники значительно увеличивает габариты и сложность силового питания для импульсных ламп, предъявляет повышенные требования по безопасности, требует высококвалифицированного обслуживающего персонала, повышает эксплуатационные расходы.

Для обеззараживания воды и воздуха путем деструкции микроорганизмов при нагреве импульсным излучением не разработана нормативная база по применению и эксплуатации промышленных установок, не выбраны типы микроорганизмов для надежной оценки качества оборудования.

Основные характеристики и возможности при бактерицидной обработке ртутными и импульсными ксеноновыми лампами приведены в таблице.

Выводы

1. Дезинфекция импульсным излучением зависит от пиковой мощности и длительности импульса УФ излучения. При мощности ниже пороговой (1–3 кВт/см²) обеззараживание осуществляется бактерицидным УФ излучением, необходимая доза которого определяется интегрированием импульса излучения по времени и по бактерицидному спектру. Импульсные ксеноновые лампы в несколько раз проигрывают по эффективности преобразования электроэнергии в УФ излучение экологически безопасным амальгамным лампам и могут быть использованы в специальных условиях, когда не допускается наличие ртути либо для повышения экологической безопасности. Если мощность импульсного УФ излучения меньше пороговой, то единственное преимущество – это возможность в течение короткого промежутка времени произвести обеззараживание, например медицинских материалов или упаковки.

2. При мощности импульса УФ излучения выше пороговой 1–3 кВт/см² работает еще один механизм стерилизации, когда в результате перегрева микроорганизма при поглощении УФ излучения в спектральных диапазонах А, В, С происходит его термическое разрушение. Излучение в видимой и инфракрасной областях спектра не вносит существенного вклада в нагрев микроорганизмов. Термическую стерилизацию при мощности выше пороговой можно проводить на расстояниях не более 10–15 см от лампы. Этот механизм позволяет проводить: 1) стерилизацию по отношению к микроорганизмам, устойчивым к бактерицидному УФ излучению, например плесени; 2) обеззараживание и стерилизацию только мягким УФ излучением из областей А и В, если жесткое бактерицидное излучение из области С неприменимо из-за инициирования нежелательных химических реакций или повреждения образца; 3) стерилизацию образцов внутри прозрачной упаковки. Можно стерилизовать

биологические растворы, медицинские материалы, контактные линзы или другие образцы, поверхности, пищевые продукты, производить стерилизацию упаковочного материала и образцов внутри упаковки импульсным УФ излучением, проходящим через материал упаковки. На больших расстояниях (~1 м) от лампы перегревной механизм не работает при существующих мощностях ламп.

Параметры ртутных и импульсных ксеноновых ламп для бактерицидной обработки.

| Параметры | Ртутная лампа низкого давления | Ртутная лампа высокого давления | Амальгамная лампа | Импульсная ксеноновая лампа |
|--|--------------------------------|---------------------------------|-------------------|--|
| Количество металлической ртути в лампе, мг | 3–10 | 100–300 и более | 0,00003 в парах | Нет |
| КПД бактерицидного излучения (с учетом кривой бактериологической эффективности), % | 30–40 | 8–11 | 30–40 | 8–10 |
| Ресурс лампы, тыс. часов | 12–16 | 3–5 | 12–16 | 1 (при частоте 30 Гц) |
| Ресурс источника питания, тыс. часов | 50 | 50 | 50 | 1–5 |
| Масса источника питания, кг | 0,2 | 5–10 | 0,5 | 5–30 |
| Стоимость источника питания, евро | 5–10 | 200–400 | 50–100 | 5000–10000 |
| Гарантированное обеззараживание воздуха в помещениях или потоков воды и воздуха | Да | Да | Да | Частота повторения импульсов должна быть достаточно высокой. При низкой частоте импульсов некоторые объемы не получают необходимую дозу УФ излучения |
| Возможность использования перегревного механизма стерилизации | Нет | Нет | Нет | Позволяет стерилизовать микроорганизмы, устойчивые к УФ излучению, стерилизовать растворы и предметы внутри упаковок |
| Наработка озона и других побочных веществ | Нет | Есть | Нет | Есть |
| Простота эксплуатации | + | + | + | - Требуется высококвалифицированный персонал |
| Безопасность эксплуатации | + | - Нарабатывается озон | + | - Высокое напряжение (5–15 кВ) Нарабатывается озон |
| Эксплуатационные расходы | Низкие | Низкие | Низкие | Высокие |
| Наличие нормативной базы | Есть | Есть | Есть | Нет |

3. Не рекомендуется применять импульсные источники с низкой частотой следования для обеззараживания воздуха в помещениях, а также потоков воды или воздуха, поскольку невозможно гарантированно обеспечить бактерицидную дозу во всем обработанном объеме.

4. Работы по обеззараживанию воды и воздуха путем деструкции микроорганизмов при нагреве импульсным излучением находятся на стадии экспериментальных исследований, не разработаны нормативная база по их применению, рекомендации, а также методики конструирования и приме-

нения промышленных установок, не определены минимальные значения пиковой плотности мощности излучения для дезинтеграции различных видов микроорганизмов и зависимость этих значений от условий внешней среды, не выбраны типы микроорганизмов для надежной оценки качества оборудования. Метод термической деструкции импульсным УФ излучением не может быть рекомендован к широкому применению до решения этих вопросов.

5. Стоимость оборудования на основе импульсных ксеноновых ламп на порядок больше, чем при использовании амальгамных ламп. Устройства с импульсными ксеноновыми лампами имеют более высокие энергозатраты, низкий ресурс, высокие эксплуатационные расходы, в них применяется высокое постоянное напряжение (~ 5 кВ) и импульсное (до 30 кВ), высоковольтные провода создают большую опасность. Для эксплуатации и обслуживания импульсных установок требуется высококвалифицированный обслуживающий персонал.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вассерман А.Л., Шандала М.Г., Юзбашев В.Г.* Ультрафиолетовое излучение в профилактике инфекционных заболеваний. М: Медицина, 2003. 208 с.
2. *Roger Phillips: "Sources and Applications of Ultra Violet Radiation"*, Academic Press, London LTD, 1983, ISBN 0-12-553880.
3. Справочная книга по светотехнике (Под. ред. Ю.Б. Айзенберга). М.: Знак, 2006. 972 с.
4. *Васильев А.И., Красночуб А.В., Кузьменко М.Е., Петренко Ю.П., Печеркин В.Я.* Анализ современных промышленных источников бактерицидного ультрафиолетового излучения // Светотехника. 2004. № 6. С. 42–45.
5. *Jinno M., Motomura H., Ikeda Y., and Aono M.* Fundamental Research on Xenon and Xenon-Rare Gas Pulsed Dielectric Barrier Discharge Fluorescent Lamps // Proc. of the XXVI ICPIG 2003/ Greifswald. Germany. July 2003. P. 320–321.
6. *Wekhof A., F.-J.Trompeter, O.Franken.* Pulsed UV Disintegration(PUVD): a new sterilization mechanism for packing and broad medical-hospital application. The First International Conference on Ultraviolet Technologies, June 14-16, 2001, Washington D.C. USA.
7. *Wekhof A.* Disinfection with flash lamps // PDA J. of Pharmaceutical Science and Technology. 2000. V.54. P.264–267.
8. *Dunn J., Burgess D., Leo F.* Investigation of Pulsed Light for terminal Sterilization of WFI Filled Blwo/Fill/Seal Polyethylene Containers // PDA J. of Pharmaceutical Science and Technology. 1997. V.51, N3. P.111–115.
9. *Schaefer R., Grapperhaus M.,Linden K. G.* Status Report on the Development and Use of Pulsed UV Technologies for Treating Water // IUVA World Congress on Ozone and Ultraviolet Technologies. Los Angeles. 2007. August 27–29. TuePM8.
10. *McDonald, K.F.; Curry, R.D.; Hancock, P.J.* Comparison of pulsed and CW ultraviolet light sources to inactivate bacterial spores on surfaces // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30. Issue 5. P. 1986–1989.
11. *McDonald, K.F.; Curry, R.D., Clevenger, T.E.; Unklesbay, K.; Eisenstark, A.; Golden, J.; Morgan, R.D.* A comparison of pulsed and continuous ultraviolet light sources for the decontamination of surfaces // Plasma Science, IEEE Transactions on. 2000. Vol. 28. Issue 5. P. 1581–1587.
12. *Dunn, J., Bushnell, A., Ott, T., and Clark, W.* Pulsed white light food processing. // Cereal Foods World. 1997. V.42. N7. P. 510–515.
13. *Lagunas-Solar M. C.; Piña C.; MacDonald James D.; Bolkan L.* Development of Pulsed UV Light Processes for Surface Fungal Disinfection of Fresh Fruits //Journal of Food Protection. 2006. Vol. 69. N 2. P. 376–384.
14. *Dunn J., Ott T., Clark W.* Pulsed-light treatment of food and packaging //Food Technol. 1995. V. 49. N9. P. 95–98.
15. *Камруков А.С., Корон Е.Д., Шашковский С.Г. и др.* Способ дезинфекции и стерилизации открытых поверхностей объектов, жидкости и воздуха. Патент РФ № 2001629. 1993.
16. *Камруков А.С., Козлов Н.П., Шашковский С.Г., Ялович М.С.* Новые биоцидные ультрафиолетовые технологии и аппараты для санитарии, микробиологии и медицины // Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 1. С. 32–40.
17. *Hiromoto A.* Method of sterilization. USA Patent 4464336, 1984.

18. *Otaki M., Okuda A., Tajima K., Iwasaki T., Kinoshita S., Ohgaki S.* Inactivation differences of microorganisms by low pressure UV and pulsed xenon lamps // *Water Sci. Technol.* 2003. V.47. N3. P. 185–190.
19. *Sharifi-Yazdi M. K., Darghahi H.* Inactivation of pathogenic bacteria using pulsed UV-light and its application in water disinfection and quality control // *Acta Medica Iranica.* 2006. Vol. 44. N5. P. 305–308.
20. *Wang T., Macgregor S.J., Anderson J.G., Woolsey G.A.* Pulsed ultra-violet inactivation spectrum of *Escherichia coli* // *Water Res.* 2005. V. 39 P. 2921–2925.
21. *Сарычев Г.С.* Облучательные светотехнические установки. М.: Энергоатомиздат, 1992. 240 с.
22. *Jun S., Irudayaraj J., Demirci A., Geiser D.* Pulsed UV-light treatment of corn meal for inactivation of *Aspergillus niger* // *Journal of Food Science and Technology.* 2003. V. 38. P. 883–888.
23. http://www.nemw.org/Balsurv2_UV.htm.
24. *Anderson J. G., Rowan N. J., MacGregor S. J., Fouracre R. A., and Farish O.* Inactivation of Food-Borne Enteropathogenic Bacteria and Spoilage Fungi Using Pulsed-Light // *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2000. V. 28. N. 1. P. 83–88.

Поступила 12.08.08

Summary

Analytical analysis of the capabilities of pulsed UV lamps for germicidal treatment is completed. A comparison with traditional low pressure and high pressure mercury lamps is done. The equipments with pulse xenon lamps have higher energy costs, low resource, high operating costs compared with the low-pressure mercury lamps. Xenon lamps may be used in equipments or under clean conditions without mercury.
