

## СОВРЕМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ БАКТЕРИЦИДНОГО УФ ИЗЛУЧЕНИЯ

Василяк Л.М.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Основными факторами, определяющими эффективность источников УФ излучения, являются: спектр источника, который влияет на возможность применения источника в различных технологиях, мощность лампы, КПД, полезный и полный ресурс, падение бактерицидного потока к концу срока службы лампы, компактность и стоимость электронного блока запуска и питания (ЭПРА), безопасность и технологичность использования источника, стоимость. В настоящее время выдвигаются жесткие требования по отсутствию наработки побочных продуктов в процессе эксплуатации и снижению опасности загрязнения помещений парами ртути в случае разгерметизации ламп. В случае применения источника для обеззараживания основной характеристикой является бактерицидная эффективность. Наибольшим бактерицидным эффектом обладает излучение из достаточно узкого спектрального интервала 205-315 нм, поэтому бактерицидная эффективность источника УФ излучения определяется тем, насколько близок спектр его излучения к максимуму бактерицидной чувствительности микроорганизмов. При этом либо приводится спектральная характеристика лампы, либо указывается мощность или эффективность с учетом зависимости бактерицидной эффективности от длины волны излучения.

**Источниками УФ излучения могут быть:** термические источники, электрический разряд в газах, твердотельные полупроводниковые излучатели, электровакуумные лампы, ускорители заряженных частиц, термоядерные устройства. Недостатки термических источников – низкий КПД генерации УФ излучения, сложность поддержания высокой температуры. Твердотельные полупроводниковые излучатели имеют крайне низкий КПД 0,001-0,03%, низкую мощность УФ излучения, которая не превышает нескольких мВт, низкий ресурс – сотни часов, и высокую стоимость – несколько сотен долларов. Их достоинства: небольшие размеры, возможность монтажа большого количества излучателей в плоских структурах, монохроматичность излучения, возможна передача излучения по оптоволоконному кабелю. Твердотельные полупроводниковые излучатели пока применяются мало, из-за сложности и громоздкости конструкции. Развитие нанотехнологий и разработка высокоэффективных эмиттеров на углеродных нанотрубках в будущем могут сделать эти источники конкурентоспособными с газоразрядными.

**Электрический разряд в газах** является основным источником УФ излучения, поскольку позволяет получить высокие удельные мощности УФ излучения с высоким КПД преобразования электрической энергии, изменять спектр излучения, имеет большой ресурс, достаточно прост в эксплуатации.

Для генерации УФ излучения выпускаются ртутные, водородные, ксеноновые, эксимерные, на парах металлов и другие газоразрядные лампы, колбы которых изготовлены из специального стекла или из кварца. По способу подвода энергии лампы бывают с электродами и безэлектродные, с непрерывным и импульсным режимами работы. **Электрический разряд в парах ртути** является основным источником бактерицидного УФ излучения. Для дезинфекции или обеззараживания необходимо УФ излучение из области С в диапазоне 200-280 нм, и для его генерации идеально подходит атом ртути, который излучает две сильных резонансных УФ линии с длиной волны 185 и 254 нм, причем линия 254 нм лежит вблизи максимума бактерицидной кривой. Лампы с разрядом в парах ртути подразделяют на ртутные лампы низкого давления, амальгамные лампы и лампы высокого давления. В ртутных лампах низкого давления и амальгамных лампах, источником УФ излучения является дуговой разряд низкого давления в парах ртути и инертных газах. Различие между ними заключается в источнике паров ртути: в колбу ртутных ламп помещают капельку металлической ртути, а в амальгамных лампах используют амальгаму – твердый сплав ртути с металлами. Оптимальное давление паров ртути составляет 0,8-1,5 Па, а давление инертных газов (чаще всего неона или аргона) 10-500 Па. При таких условиях 30-50% от электрической мощности разряда переходит в излучение на резонансной линии ртути с длиной волны 253,7 нм. Спектр излучения - линейный (Рис.1), доля УФ излучения на линиях 185 и 254 нм составляет 90-98% от всего излучения разряда. Ртутные лампы низкого давления обладают рядом преимуществ, таких как: длительный срок службы (более 10 тыс. часов), высокая эффективность (до 40%), низкая температура колбы (менее 100°С) и невысокая стоимость. Однако, мощность таких ламп длиной 1,5 м не превышает ~100 Вт, и УФ излучение на единицу длины лампы достигает лишь 0,2-0,3 Вт/см. При повышении мощности разряда температура стенки разрядной трубки увеличивается, что приводит к экспоненциальному росту давления паров ртути и к снижению выхода резонансного УФ излучения. Поэтому, для ртутных ламп повышенной мощности необходимо применять дополнительные меры для поддержания давления паров ртути на оптимальном уровне. Конструктивно это можно выполнить, применяя термостатирующий блок, который поддерживает температуру холодной точки на заданном уровне. Однако, широкого практического применения такие источники излучения не нашли. Применение ртутных ламп высокого давления ограничено, так как несмотря на высокую погонную электрическую мощность (~100 Вт/см), такие лампы имеют низкую эффективность (менее 12-15%), малый срок службы (менее 5 000 ч), высокую температуру колбы (>500°С). Кроме того, спектр ртутных ламп высокого давления содержит значительное количество энергии в коротковолновом диапазоне, и излучение таких ламп может приводить к возникновению нежелательных побочных эффектов – например, фотореактивации бактерий, протеканию фотохимических процессов и т.п. Широкий спектр излучения импульсных ксеноновых ламп является, скорее, недостатком, чем преимуществом, так как

его коротковолновая часть может приводить к нежелательному образованию озона и радикалов, длинноволновая - к побочным химическим реакциям и наработке вредных для человека соединений.

**Амальгамные лампы.** Устранить влияние перегрева лампы низкого давления при увеличении ее мощности до 2-3 Вт/см и сохранить высокую эффективность генерации УФ излучения 30-40% можно при использовании в лампе не металлической ртути, а ее сплавов с металлами, амальгамы. При разработке мощной амальгамной лампы низкого давления необходимо решить ряд вопросов для сохранения высокого КПД и срока службы лампы при увеличении мощности по сравнению с обычными ртутными лампами низкого давления. Это относится к газовому наполнению, конструкции электродов, материалу колбы лампы и источнику питания для такой лампы. Применяя четырехкомпонентную амальгаму можно обеспечить оптимальное давление паров ртути 1-5 Па в чрезвычайно широком диапазоне температур 60-150 С. При увеличении мощности разряда интенсивности УФ излучения возрастает до определенного уровня, а затем начинает уменьшаться, а КПД линейно снижается. КПД генерации УФ излучения зависит от давления и состава смеси инертного газа, однако КПД всегда падает при росте тока. Мощность УФ излучения при более легкой смеси газов выше и достигает насыщения при более высоких токах разряда.

**Ресурс.** Наряду с интенсивностью и эффективностью источника бактерицидного УФ излучения важную роль играют такие параметры, как физический и полезный срок службы лампы. Физический срок службы характеризуется временем горения разряда и главным образом определяется долговечностью работы оксидных электродов в плазме. Разрушение эмиссионного слоя электродов в стационарном периоде работы лампы происходит вследствие бомбардировки его ионами в катодный полупериод и электронами (основная составляющая) в анодный полупериод. При работе оксидного электрода в газоразрядной плазме оксидное покрытие электродов расходуется вследствие испарения и распыления. Применение более легких газов и уменьшение его давления приводит к сокращению срока службы катодов. Немаловажным является для физического срока службы лампы низкого давления и процесс зажигания разряда. Способ зажигания и количество циклов включения могут существенно влиять на ресурс оксидных катодов [1]. В пусковой период процессы разрушения оксидного слоя электродов обусловлены, главным образом, распылением активного вещества ионами, ускоренными в области катодного падения тлеющего разряда. При работе амальгамных ламп с использованием стандартных ЭПРА лампы после 200–300 включений выходили из строя. При исследовании этих ламп было обнаружено, что электроды этих ламп были полностью лишены оксидного слоя. Для того, чтобы избежать термодеструкции активного вещества, затягивания стадии тлеющего разряда и уменьшения негативного его влияния на активное вещество электродов лампы, были разработаны специальные ЭПРА. При работе лампы с этим ЭПРА на выводах её электродов до момента прогрева электродов до необходимой температуры

отсутствуют высокое рабочее напряжение питания лампы и высоковольтные поджигающие импульсы. Время прогрева электродов до необходимой температуры определяется током накала, текущим через электроды до зажигания дугового разряда. В отличие от случая работы лампы со стандартным ЭПРА, в данном случае отсутствует тлеющий разряд в период предварительного прогрева электродов. При таком режиме работы ЭПРА лампы выдержали более 5000 включений и продолжали работать [1].

**Полезный срок службы источников** излучения низкого давления обычно определяется как снижение интенсивности излучения на заранее заданную величину. Однако для бактерицидных ламп допустимое снижение УФ излучения определяется безопасностью, поэтому спад излучения не должен превышать 20-30%. Колба амальгамных ламп изготовлена из кварца. Было обнаружено, что атомы ртути могут реагировать с поверхностью кварца, в результате чего ртуть расходуется, что приводит к уменьшению физического срока службы лампы. Вторым нежелательным эффектом этого процесса является повышение поглощения УФ излучения колбой лампы, в результате чего происходит спад излучения лампы [2]. Для того, чтобы прекратить осаждение атомов ртути на поверхности кварца внутренность лампы покрывается тонкой пленкой из оксидов металлов. Применение более легких газов и уменьшение его давления приводит к сокращению срока службы катодов. Защитный слой препятствует проникновению ионов ртути вглубь стекла, уменьшает скорость потемнения стекла и значительно увеличивает полезное время работы [2,3]. В этом случае, уменьшение УФ излучения не превышает 20% относительно начального излучения после 10000 –12000 часов работы источников, а полезный срок службы приближается к физическому. В качестве буферного газа в лампах использовалась смесь Ar-Ne, процентное содержание неона в которой меняется от 15% до 85% в зависимости от характеристик лампы. Для достижения высокого значения эффективности выхода УФ излучения приходится понижать давление газа, что приводит к резкому износу электродов и резкому уменьшению их срока работы. В настоящее время срок эффективной работы лампы определяется ее спадом и составляет 10000-15000 в зависимости от типа лампы.

#### Литература

1. Василяк. Л.М., Васильев А.И., Костюченко С.С., и др. Влияние пускового режима на срок службы электродов мощных амальгамных ламп низкого давления. // Светотехника. 2009. №4. С. 4-9.
2. Василяк Л.М., Васильев А.И., Костюченко С.В., и др. Влияние защитного слоя на длительность горения и излучение кварцевых газоразрядных ламп низкого давления. // Письма в ЖТФ. 2006, Том 32, вып. 1, стр. 83-88
3. Василяк Л. М., Васильев А.И., Дроздов Л. А и др.. Защитное покрытие внутренней стороны колбы кварцевой амальгамной лампы низкого давления как решающий фактор срока ее службы. // Прикладная физика. 2009. №1. С. 120-124.

## ПРИМЕНЕНИЕ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ И УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ

Василяк Л.М.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Для повышения эффективности обеззараживания некоторые производители оборудования предлагают применять дополнительную обработку воды ультразвуком (УЗ). В частности, на российском рынке представлено промышленное оборудование для обеззараживания воды, сочетающее в себе обработку УФ излучением и ультразвуком. В качестве преимущества такого оборудования перед традиционными системами УФ облучения анонсируется более выраженный эффект обеззараживания и отсутствие необходимости в очистке кварцевых чехлов. Рассмотрим возможности применения ультразвука в системах обеззараживания воды.

**Биологическое действие УЗ** известно давно [1]. Эффект воздействия УЗ на микроорганизмы зависит от интенсивности УЗ воздействия и может быть диаметрально противоположным. При низких интенсивностях и малых временах воздействия ультразвук может стимулировать активность и рост микроорганизмов [1]. Однако такие процессы в очищенной или обеззараженной воде крайне нежелательны и могут привести к неприятным последствиям. Согласно исследованиям [2], обработка упакованной питьевой воды ультразвуком с частотой 22 или 35 кГц в течение 15 секунд никак не влияла на ОМЧ, однако при увеличении времени экспозиции до 30 секунд ОМЧ увеличилось более чем в 10 раз [2].

При больших интенсивностях ультразвук подавляет и разрушает микроорганизмы. Длительная обработка воды ультразвуком большой мощности приводит к обеззараживанию [1]. Бактерицидное действие УЗ, в основном, связано с кавитацией. Кавитация возникает при интенсивностях УЗ выше  $0,3-1 \text{ Вт/см}^2$ . Для обеззараживания необходима интенсивность УЗ более  $2 \text{ Вт/см}^2$  при частоте 20-50 кГц. Исследования УЗ обеззараживания сточной воды [3] показали, что для уменьшения e-coli или фекальных колиформ на три порядка необходима УЗ обработка воды в течение 60 мин при плотности УЗ мощности 400 Вт/л. Для сравнения аналогичный эффект обеззараживания УФ облучением, обеспечивается при энергетических затратах порядка 0,02-0,04 Вт·час/л. Если принять моноэкспоненциальное уменьшение микроорганизмов по времени, то наблюдаемое уменьшение соответствует обеззараживанию УФ излучением с облученностью  $1 \text{ мкВт/см}^2$  [3]. Полученные затраты УЗ энергии в несколько тысяч раз выше, чем при УФ обеззараживании сточных вод. Большие энергетические затраты, отсутствие нормативных документов, регламентирующих использование метода, делают способ УЗ обеззараживания неконкурентоспособным для промышленного использования.

**Совместное использование разных методов обеззараживания** целесообразно в случаях, если один из методов не обладает необходимым свойством, или если совместное использование обеспечивает синергетический эффект, и позволяет интенсифицировать процесс. Интересным вопросом является возможность использования УЗ с другими методами. УЗ обработка воды повышает эффективность хлорирования [4], озонирования [5,6] или использования химических веществ [6], таких как  $H_2O_2$  или  $TiO_2$ . Вероятным механизмами УЗ воздействия является разрушение взвешенных частиц, доставка новых порций окислителя в частицы, перемешивание воды у поверхности кристаллов  $TiO_2$  и повреждение микроорганизмов при возникновении кавитации, что уменьшает их сопротивляемость по отношению к окислителям.

Совместное использование УФ и УЗ обработки не обладает синергетическим эффектом [3]. Вклад УЗ в инактивацию микроорганизмов по сравнению с УФ воздействием незначителен. Механизм влияния УЗ обработки сточной воды до стадии УФ обеззараживания заключается в том, что УЗ разрушает большие взвешенные частицы, и эффективность обеззараживания УФ излучением микроорганизмов, которые находились внутри, возрастает [3]. Этот эффект не является синергетическим, поэтому УЗ обработку можно провести до обработки УФ излучением. Обработка воды ультразвуком после УФ обеззараживания не дает дополнительного эффекта. В сточной воде содержатся взвешенные в количестве 1-10 мг/л, причем, в отличие от питьевой воды, частицы с размерами более 50 мкм могут составлять основную часть, например, в работе [3] их было 63%. УЗ обработка сточной воды в течение 5 с уменьшала количество взвешенных частиц с размерами более 50 мкм на 25% при объемной мощности УЗ 50 Вт/л (энергия 250 Дж/л) и на 60% при 310 Вт/л (энергия 1550 Дж/л). Однако, как следует из этих исследований, энергетические затраты на дополнительную УЗ обработку в несколько раз превышают затраты на УФ обеззараживание. Для современных станций УФ обеззараживания сточной воды столь большие энергетические затраты на дополнительную УЗ обработку экономически не оправданы. УЗ обработка питьевой воды вообще не имеет смысла, поскольку в ней содержится мало частиц с большими размерами.

**Использование УЗ для очистки кварцевых чехлов в УФ оборудовании.** Использование УЗ в жидкости для очистки поверхностей известно. При УЗ очистке и обеззараживании воды наиболее важными механизмами являются акустические течения, механические напряжения и кавитация. Действие УЗ при очистке поверхностей, в основном, сказывается на ускорении процесса растворения загрязнений в растворителях, доставке свежих порций растворителя к поверхности и удалении отделившихся частиц. УЗ обработка скорее интенсифицирует процесс химической очистки и облегчает удаление загрязнения, а не заменяет эти процессы. Очищаемые объекты не должны экранировать друг друга от воздействия УЗ. Если вблизи поверхности возникает кавитация, то она агрессивно действует на поверхность. При этом будет происходить не только очистка поверхности, но

и эрозия кварцевого чехла, и неизбежное дальнейшее загрязнение поверхности и снижением пропускания УФ излучения. Дальнейшая химическая промывка или механическая очистка таких кварцевых чехлов с шероховатой загрязненной поверхностью будут неэффективны. В реальных условиях обеззараживания сточных вод элементы установок и кварцевые чехлы загрязняются водорослями и другими достаточно крупными элементами, на которые ультразвук не действует, но зато они хорошо убираются механической очисткой. При других условиях возможность УЗ очистки будет определяться индивидуальными свойствами воды и типом загрязнений. При образовании на поверхности кварцевых чехлов тонкой плотной пленки из неорганических веществ, которые имеют большую энергию связи с поверхностью, УЗ очистка также не будет эффективной, поскольку такие пленки являются кавитационно стойкими. Если неорганические или органические загрязнения образуют рыхлый слой, то проще и дешевле применять механическую очистку. Эффективность УЗ обработки для предотвращения загрязнения кварцевых чехлов УФ ламп или их очистки не доказана. В настоящее время все ведущие производители УФ оборудования для обеззараживания воды не применяют УЗ для очистки чехлов, а используют механическую очистку и химическую промывку.

**Эксплуатация УЗ оборудования.** При применении УЗ следует также принимать во внимание процессы, которые могут повлиять на конструкцию установок, режим эксплуатации, эксплуатационные расходы, на требования к размещению и к обслуживающему персоналу и т.д. Из возможных негативных последствий применения УЗ необходимо обратить внимание на повышенную эрозию под воздействием кавитации и возможное повышенное разрушение конструкционных материалов. Ресурс существующих УЗ излучателей имеет срок службы, примерно, соответствующий сроку службы УФ ламп, поэтому к эксплуатационным расходам на замену ламп добавятся расходы по замене УЗ излучателей и генераторов. При использовании УЗ необходимо применять дополнительные меры по защите персонала от воздействия УЗ. Ввиду особой опасности контактного воздействия УЗ на людей процесс УЗ обработки должен полностью исключать возможность такого воздействия. Установки должны быть сертифицированы на применение УЗ. Все наружные поверхности установок УЗ обработки следует покрывать звукоизоляционным слоем. Но даже при этом УЗ может распространяться по металлическим конструкциям на большие расстояния, например, по системам распределения воды. УЗ по может проникать в помещения с людьми и вызывать головную боль, быструю утомляемость с падением кровяного давления и другие нежелательные последствия. По этим причинам применение УЗ при обеззараживании сточных вод УФ излучением в открытых каналах практически невозможно.

**Выводы.**

1. При УЗ обеззараживании воды энергетические затраты в несколько тысяч раз превышают затраты энергии при УФ методе, что делает самостоятельное использование УЗ метода не конкурентоспособным.
2. Воздействие малых доз УЗ имеет противоположный обеззараживанию эффект – стимулирует увеличение общего числа микроорганизмов в воде.
3. В настоящее время использование метода УЗ обработки для обеззараживания воды в коммунальных системах невозможно, поскольку отсутствуют критерии контроля этого процесса и нормативные документы, регламентирующие его применение.
4. Совместное использование УФ и УЗ обработки с целью повышения надежности обеззараживания нецелесообразно. Одновременное применение этих методов не дает синергетического эффекта, используемые дозы УФ облучения и так обеспечивает требуемую степень обеззараживания, как сточных, так и природных вод.
5. Применение ультразвука для предотвращения загрязнения или очистки кварцевых чехлов УФ ламп не может заменить традиционно используемые химическую или механическую очистки. В связи с этим, ни один из ведущих производителей УФ оборудования не использует УЗ для очистки кварцевых чехлов. Отсутствуют данные о влиянии УЗ на срок службы УФ ламп.
6. При эксплуатации оборудования, имеющего блоки ультразвуковой обработки, необходимо обеспечить защиту персонала от воздействия ультразвука в соответствии с нормативами.
7. Использование ультразвука дополнительно к ультрафиолетовому облучению не дает преимуществ, а приводит к необоснованному увеличению энергетических затрат и усложняет мероприятия по обеспечению безопасности эксплуатации.

### Литература

1. Эльпинер И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие. М., 1963, 420 с.
2. Перевалов В.Д., Рвачев А.П. Ультразвуковая обработка воды. // VIII Межд. форум "Мир чистой воды – 2006", VIII Межд. конф. " Вода, напитки, соки, технологии и оборудование", Москва, 26-29 сентября 2006 г. Сб. матер. конф., М., 2006, с.91-93.
3. Blume T., Neis U. Improved Waste Water Disinfection by Ultrasonic Pre-treatment. // Ultrasonics Sonochemistry, 2004. Vol. 11. N5. P. 333-336.
4. Blume T, Neis U. Improving chlorine disinfection of wastewater by ultrasound application. // Water Sci Technol. 2005. Vol.52. N 10-11. P.139-144.
5. Hua, I. and Hoffmann, M.R. Optimization of ultrasonic irradiation as an advanced oxidation technology. // Environ.Sci.Technol. 1997. V. 31. P. 2237-2243.
6. Jyoti K.K, Pandit A.B. Hybrid cavitation methods for water disinfection: simultaneous use of chemicals with cavitation. // Ultrason Sonochem. 2003. V. 10. N 4-5. P.255-64