

Физические методы дезинфекции (обзор)

Л. М. Василяк

Рассмотрены основные физические методы дезинфекции воздуха, воды и поверхностей, такие как фильтрация, озонирование, воздействие ультрафиолетовым излучением, фотокатализ, холодная плазма, электрический разряд, электропорация в электрическом поле. Основное внимание уделено рассмотрению традиционных и новых методов обеззараживания воздуха. Даны рекомендации по применению импульсного УФ-излучения. Проанализированы возможности применения электрического поля для дезинфекции воды и воздуха.

Ключевые слова: дезинфекция, обеззараживание, микроорганизмы, фильтрация, УФ-излучение, электрический разряд, фотокатализ, плазменная медицина, электропорация.

Введение

В течение длительного времени для обеззараживания и дезинфекции воды и поверхностей применялись окислительные технологии с применением хлора и других химических дезинфектантов. Для воздуха эти химические технологии не применялись, поскольку большинство химических дезинфектантов либо ядовиты, либо оказывают крайне негативные воздействия на здоровье людей при их вдыхании с воздухом. Многолетние отечественные и зарубежные медицинские исследования влияния химических дезинфектантов на здоровье населения показывают устойчивую корреляцию между заболеваниями органов дыхания, пищеварения, воспалений слизистых оболочек и содержанием в атмосфере применяемых химических реагентов. В 70-х годах прошлого столетия было также обнаружено, что образующиеся при хлорировании воды побочные продукты, в основном, галогенорганические соединения, в питьевой воде представляет опасность для здоровья людей, а в сточных водах наносят серьезный ущерб экологии водоемов. При этом хлорирование и другие окислительные технологии обеззараживания малоэффективны по отношению к вирусам.

Несмотря на то, что история обеззараживания воды длится уже два столетия, в настоящее время развиваются новые методы и особенно активно

физические методы, в том числе совершенствуются известные методы, например, применение ультрафиолетового (УФ) излучения [1].

Обеззараживание воздуха в течение длительного времени проводилось, в основном, в лечебно-профилактических учреждениях и только в последнее время начинает применяться на транспорте, в торговых и офисных помещениях. У этой тенденции имеются объективные причины. Воздушно-капельные инфекции представляют одну из острых проблем инфекционной безопасности. Появление новых опасных видов инфекций, передающихся воздушно-капельным путем, наличие угроз биотерроризма, перевозка инфицированных пассажиров в городах с массовым скоплением людей, возможность перевозки за короткий срок инфекции на большие расстояния, например, самолетом, повышают риск распространения инфекционных заболеваний. Это, в свою очередь, повышает актуальность совершенствования имеющихся методов обеззараживания воздуха и создание новых. Обеззараживание воздуха необходимо в местах массового пребывания людей: больницы, общественный транспорт, вокзалы, школьные учреждения, театры, закрытые спорткомплексы и др. Остаются проблемы и с обеззараживанием в лечебных учреждениях. От 5 % до 10 % пациентов, поступающих в современные стационары в развитых странах, получают внутрибольничную инфекцию [2, 3]. При этом одним из основных факторов передачи внутрибольничной инфекции являются воздух и поверхности [4].

Обеззараживание воздуха закрытых помещений имеет свои особенности: сложность или невозможность применения химических дезинфектантов в присутствии людей, быстрое перемешивание и перетекание воздуха в различных по-

Василяк Леонид Михайлович, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.
Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 9 февраля 2018 г.

мещениях, наличие в помещениях источников инфицирования (больные люди) и возможность повторного инфицирования воздуха [4]. Применение в целях обеззараживания химических реагентов приводит к неоправданному росту химической нагрузки на человеческую популяцию. В отличие от промышленных химических загрязнений, дезинфектанты вносятся непосредственно в среду обитания человека и их применение жестко ограничено нормативами на остаточное содержание стерилизующих средств.

В связи с появлением новых, ранее не использовавшихся в повседневной практике методов обеззараживания, а также активная реклама новых технологий и их новых возможностей, иногда ставят потребителей перед сложным выбором, особенно для обеззараживания в ответственных местах, например, в больницах, операционных и послеоперационных палатах и т. д. Особенно сложным этот вопрос становится при выборе методов и оборудования для обеззараживания воздуха, когда необходимо учесть эффективность и надежность обеззараживания, размеры помещения, длительность обработки, простоту эксплуатации, стоимость оборудования, размеры и вес, и другие факторы.

Учитывая сказанное, целью данной работы являлось сравнительное рассмотрение **физических методов дезинфекции** (обеззараживания) воздуха, воды и поверхностей, причем как традиционных, так и относительно новых.

Основные физические методы дезинфекции

Наиболее ранним из физических методов является нагревание, которое в настоящее время, в основном, используется для дезинфекции и стерилизации медицинских инструментов и оборудования специального назначения, например, стерилизация космических аппаратов, отправляемых на другие планеты. Ограничения метода связаны с термической стойкостью обрабатываемых образцов или с их большими размерами. Для этих же целей применяют и жесткое гамма-излучение, однако этот метод имеет еще больше ограничений. Для обеззараживания воздуха и воды в настоящее время известны и опробованы различные физические методы: фильтрация, озонирование, воздействие ультрафиолетовым излучением [1], фотокатализ, холодная плазма. В последнее время для обеззараживания воздуха и воды предлагается использовать сильные электрические поля, в которых происходит разрушение или электропорация микроорганизмов. Для дезинфекции поверхностей, кроме этих методов, разрабатываются также

специальные покрытия. Проанализируем эти методы и оборудование на их основе.

Фильтрация

Чистый воздух – среда, не поддерживающая размножение микроорганизмов; это определяется отсутствием питательных веществ и недостатком влаги. Кроме того, в воздухе более выражено бактерицидное действие солнечных лучей УФ-спектра. Жизнеспособность микроорганизмов в воздухе обеспечивают взвешенные частицы воды, слизи, пыли и фрагментов почвы. В настоящее время общепринятой является точка зрения о том, что микроорганизмы в воздухе замкнутых помещений находятся в виде бактериального аэрозоля – коллоидной системы, состоящей из газообразной среды (воздуха), в которой находятся мельчайшие капельки жидкости или частицы твердого вещества, с заключенным в них заразным материалом (микроорганизмы).

Бактериальный аэрозоль состоит из трех достаточно четко разграниченных фаз, а именно: твердые частицы, крупнокапельная, содержащая крупные инфицированные капли слюны или слизи размером более 100 мкм, и капельно-ядерная размером менее 100 мкм. Основное количество опасных микроорганизмов поступает в воздух от человека, животных и продуктов их жизнедеятельности. Патогенные микроорганизмы выбрасываются в воздух вместе со средой, в которой они находятся. (Например, при разговоре выделяется до 800 частиц в минуту, при однократном чихании – в среднем 40000.) Это справедливо и в отношении патогенных микроорганизмов, попадающих в воздух от больных людей и других бациллоносителей.

При очистке воздуха в той или иной степени происходит и его обеззараживание. Физически удаляя частицы из объема различными способами, например, фильтрованием, или окисляя химически вредные компоненты в объеме и на поверхности, или сорбируя те или иные примеси, мы всегда понижаем и концентрацию микроорганизмов в воздушной смеси. В этом смысле вентиляция (естественная или искусственная) является одним из методов очистки и обеззараживания воздуха в помещении.

Обеззараживание воздуха путем фильтрации позволяет снизить концентрацию микроорганизмов в помещении до приемлемого уровня. Это достаточно простой и эффективный метод для определенных условий. Для удаления мелких пылевых частиц из воздуха используют два основных метода. Первый, это когда очистка осуществляется с помощью помещенного поперек потока воздуха

волоконного или пористого материала (т. н. механические фильтры), и второй, когда захват частиц производится электрическим полем с последующим их осаждением (электрофильтр). Например, высокоэффективный механический фильтр (HEPA-фильтр) предназначен для улавливания частиц с размерами 2 мкм и менее. Фильтрующая среда такого фильтра выполнена из стеклянных волокон с диаметрами в диапазоне 0,1–10 мкм, причем расстояние между волокнами, как правило, гораздо больше размеров улавливаемых частиц. При фильтрации воздуха микроорганизмы захватываются волокнами фильтра и удерживаются на их поверхности за счет поверхностных сил, в частности, сил Ван-дер-Ваальса.

Фильтровальные системы, наполнители и методы фильтрации непрерывно совершенствуются. Новые фильтры с применением фильтрующих полимерных волокон нанометровых размеров способны улавливать пылевые частицы и микроорганизмы с размерами менее 1 мкм. Такие фильтры дороги, обладают небольшим ресурсом, создают большое сопротивление протекающему воздушному потоку, однако позволяют проводить тонкую фильтрацию.

Электрофильтры широко используются для удаления пыли в технологических процессах уже более столетия. В электрофильтрах заряженные микрочастицы в электрическом поле притягиваются к электроду другого знака (т. н. осадительный электрод). Зарядка микрочастиц может происходить как вследствие трения о воздух в электрическом поле или с помощью дополнительного устройства. Фильтры с электростатическим зарядом на самом фильтре или на частицах имеют низкую стоимость, но и низкую эффективность. Двухкаскадные электрофильтры содержат каскад зарядки частиц, обычно с помощью коронного разряда, и каскад осаждения. Электроды в каскаде осаждения могут быть в виде металлических пластин, размещенных параллельно потоку, причем электрическое поле между пластинами направлено перпендикулярно потоку воздуха. Заряженные частицы в электрическом поле движутся перпендикулярно воздушному потоку и осаждаются на пластинах. По мере накопления пыли осадительные пластины следует чистить или стряхивать с них пыль.

В других конструкциях каскад сбора состоит из нескольких пористых электродов, на которые подано напряжение, между ними могут быть расположены пористые изоляционные пластины, например, из вспененного полиуретана. Все эти пластины расположены поперек воздушного потока и перекрывают все сечение. В этом случае захваченные микрочастицы находятся в глубине

пористых электродов или пористых диэлектрических пластин, и как правило, очистка таких пластин не предусмотрена, а производится их замена. Расположенные поперек потока пористые пластины приводят к значительному перепаду давления, и как следствие к увеличению мощности вентилятора. При монтаже таких фильтров в уже существующую систему вентиляции потери давления могут быть столь значительными, что от такого расположения осадительных пластин приходится отказаться.

Поскольку фильтрование воздуха будет производиться всегда, то фильтрующие системы постоянно совершенствуются. Возникают и новые методы фильтрации, например, фильтрация динамическими электрическими полями, создаваемые специальными ловушками, которые, в отличие от обычных электростатических фильтров, могут быть настроены на селективное удаление частиц, обычно плохо удаляемых другими методами, например, в области от 0,1 до 1 мкм [5, 6]. Такие фильтры могут быть использованы не только для селективного удаления частиц пыли, но и для селективного удаления микроорганизмов определенного размера, что может существенно увеличить эффективность обеззараживания требуемых патогенов.

Инактивация микроорганизмов в фильтрах

В обычных фильтрах захваченные микроорганизмы не погибают, а остаются жизнеспособными некоторое время, т. е. фильтр при эксплуатации фактически накапливает жизнеспособные микроорганизмы. Из-за этого существует риск т. н. «залповых выбросов» жизнеспособных микроорганизмов в воздухопровод и затем в помещения. Это связано с тем, что если по какой-то причине вентиляционная система была отключена, а фильтры при этом не были заменены новыми, то при следующем включении вентиляции фильтры подвергнутся пневмоудару. Это приведет к вылету пыли и микроорганизмов из фильтра в воздушный канал или в помещение. Здесь возникает ряд сложностей при смене фильтров, поскольку на них могут накапливаться патогены и они представляет собой потенциальную опасность. При замене таких фильтров значительно увеличивается риск контаминации воздушного канала и помещений патогенными микроорганизмами, а также вероятность заражения персонала.

Проблемы смены фильтров и залповых выбросов относятся к контролируемым рискам. Это означает, что при выполнении всех необходимых требований (например, точное исполнение процедуры замены фильтров) вероятность возникнове-

ния негативных последствий снижается до приемлемого минимального уровня. Однако при эксплуатации HEPA-фильтров существуют и неконтролируемые риски. Самым опасным из них является возможность роста и размножения микроорганизмов на поверхности фильтров. По данным работы [7], примерно в 20 % эксплуатируемых фильтров произрастают различные виды грибов (визуально фильтры обрастают плесенью). Таким образом, использование в медицинских организациях систем обеззараживания воздуха, основанных только на фильтрации, является потенциально опасным, поэтому в инфекционных отделениях использование фильтров с накоплением патогенов запрещено.

Для повышения безопасности и эффективности в некоторых современных установках фильтрации воздуха осуществляется также дополнительная инактивация микроорганизмов. Обычно на первом этапе идет фильтрация воздуха, а затем собственно инактивация задержанных фильтром микроорганизмов. Такие устройства можно разделить на три группы:

- высокоэффективные (HEPA) фильтры с биоцидной пропиткой, инактивация микроорганизмов на которых осуществляется при их контакте с химическими соединениями;
- установки с т. н. активной фильтрацией, в которых для инактивации задержанных на фильтрах микроорганизмов используют химически активные вещества (озон, активные формы кислорода, радикалы), которые вырабатываются дополнительным устройством (например, озонатором или электрическим разрядом);
- установки, в которых задержанные фильтром микроорганизмы инактивируются ультрафиолетовым облучением.

Однако для систем, использующих химические соединения (биоцидную пропитку, озон и т. д.), существует опасность формирования резистентных форм микроорганизмов к использованию данного химического дезинфектанта. Другими словами, химическую пропитку необходимо обновлять. Кроме того, подобные установки, особенно генерирующие озон, являются потенциально опасными при эксплуатации, поскольку выделяют токсичные соединения и требуют соблюдения специальных мер безопасности.

Вследствие вышеуказанных недостатков фильтрации, для обеззараживания воздуха применяют дополнительно другие методы и устройства, осуществляющие инактивацию или разрушение микроорганизмов. К таким методам относятся воздействие ультрафиолетовым (УФ) излучением, фотокатализ, плазма электрических разрядов и др.

Воздействие ультрафиолетовым излучением

Инактивация микроорганизмов УФ-излучением давно является общепризнанным физическим методом с высокой эффективностью [1, 8–10]. Для обеззараживания УФ-излучением часто применяют открытые облучатели, поскольку эффективность использования бактерицидного потока ультрафиолетового излучения лампы в этом случае наиболее высокая. В настоящее время для обеззараживания воздуха и поверхностей наблюдается тенденция применения все более мощных УФ-облучателей, обеспечивающих высокие дозы излучения за короткое время обработки [10]. Единичные мощности таких систем составляют от сотен ватт до нескольких киловатт. Подобные современные передвижные УФ-комплексы разрабатываются в России и за рубежом [10].

Практический многолетний опыт использования УФ-излучения для обеззараживания, в основном, основан на применении ламп с электрическим разрядом в парах ртути низкого давления, которые в бактерицидной области излучают одну линию с длиной волны 254 нм. В последнее время были достигнуты серьезные успехи в разработке нового поколения УФ-ламп низкого давления, в которых источником паров ртути является амальгама. Амальгамные лампы имеют высокую погонную мощность бактерицидного излучения, высокий КПД (30–40 %) и большой полезный срок службы (12000–16000 часов).

Обеззараживание УФ-излучением с использованием амальгамных и ртутных ламп низкого давления является экологически безопасным, экономичным и удобным в эксплуатации методом, который сочетает в себе высокую эффективность обеззараживания, отсутствие вредного влияния на воздух, низкие эксплуатационные расходы, простоту эксплуатации и компактность УФ-установок. Источники УФ-излучения можно использовать как для обработки воздуха во всем помещении, так и в закрытых воздуховодах или рециркуляторах. Обработка поверхностей УФ-излучением также является эффективным способом, однако, в отличие от воздуха, доза УФ-излучения может сильно зависеть от вида и состояния поверхности, поскольку микроорганизмы могут быть защищены биологическими составляющими, например, слизью, в результате чего в большинстве случаев требуемая доза энергии УФ-излучения может значительно вырасти [1].

Что касается обеззараживания воды, то за последние 20 лет УФ-технология достигла столь высокого уровня, что практически всегда является основной. В настоящее время во всем мире технологию хлорирования питьевых и сточных вод за-

меняют на технологию УФ-обеззараживания, а озонирование во многих случаях является предварительной стадией перед этапом УФ-обеззараживания.

В последнее время появились предложения [11–14] использовать для обеззараживания импульсные ксеноновые лампы с пиковой мощностью импульса излучения 5–10 МВт, 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. К настоящему времени установлено, что импульсное излучение обладает бактерицидным действием, и что 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 [11–14], механизм дезинфекции импульсным излучением имеет 2 составляющих: одна из них – общеизвестное воздействие бактерицидным УФ-излучением, другая – разрушение микроорганизма в результате его перегрева при поглощении всего УФ-излучения. При интенсивности импульса УФ-излучения в спектральных диапазонах А, В, С (200–400 нм) выше 1–3 кВт/см² происходит перегрев микроорганизмов и их термическое разрушение, поскольку скорость подвода лучистой энергии превышает скорость сброса тепловой энергии микроорганизмом в окружающую среду [11]. Экспериментально показано, что излучение из видимой и инфракрасной областей спектра не вносит существенного вклада в нагрев микроорганизмов [11, 12].

В соответствии с представленными исследованиями, обработку импульсным УФ-излучением условно можно разделить на два диапазона: 1) если облученность намного ниже порогового значения 1 кВт/см², то это диапазон низких облученностей, где работает только традиционный механизм разрушения молекул ДНК; 2) при облученностях выше 5–10 кВт/см² происходит перегрев микроорганизма и его термическое разрушение. Такие высокие облученности можно создать импульсными ксеноновыми лампами на расстояниях от обрабатываемых поверхностей не более 10–50 см, поэтому оно уже применяется для дезинфекции медицинских препаратов, растворов и инструментов, пищевых продуктов, упаковочных материалов

и различных поверхностей для пищевой, медицинской, парфюмерной промышленности.

При указанном условном делении, естественно, есть и промежуточная область импульсной облученности. В этой области термическая деструкция не происходит, однако, если мощность еще достаточно высока, то поглощение УФ-излучения внешними мембранами протеиновых клеток в конечном итоге может приводить к повреждению биологических мембран и нарушению синтеза различных компонентов мембран и клеточной оболочки, а затем и к гибели клетки [11]. Помимо разрушений в ДНК и РНК, УФ-излучение также вызывает фотохимические реакции в белках, ферментах и других молекулах внутри клетки. Поглощение белка имеет локальный максимум около 270–280 нм, а при длинах волн ниже 240 нм сечение поглощения белков растет, при этом также есть некоторое поглощение пептидной связью (-CONH-) белков. Другие биологические молекулы с ненасыщенными связями могут также быть восприимчивыми к УФ-воздействию. Все эти факторы способствуют повышению эффективности импульсного УФ-излучения. Существенным недостатком применения импульсного излучения в этом диапазоне импульсной мощности является отсутствие экспериментальных данных, позволяющих выявить механизмы воздействия и определить критерии для их реализации, а также большая неопределенность эффективности воздействия на микроорганизмы различных типов.

При импульсной мощности в зоне обеззараживания ниже пороговой, импульсные источники УФ-излучения могут быть использованы аналогично обычным бактерицидным лампам. В этом случае бактерицидное воздействие зависит от доли УФ-излучения бактерицидного диапазона с учетом бактерицидной эффективности [1]. В работе [15] проводилось сравнение эффективности обеззараживания установки Tru-D с традиционными ртутными лампами низкого давления и оборудования с импульсной ксеноновой лампой. В силу того, что потребляемая мощность и конструктивные особенности установок различны, они тестировались по заявленным паспортным параметрам: время облучения и условия работы. При одинаковых условиях была исследована эффективность УФ-облучателей с импульсной ксеноновой лампой и постоянного УФ-С облучения на расстоянии 4 фута (122 см) и времени воздействия 10 минут. Исследовалась инактивация спор *Clostridium difficile*, метициллин-устойчивых *Staphylococcus aureus* (MRSA), а также ванкомицин-устойчивых *Enterococcus* (VRE), нанесенных на предметное стекло, и оценивалось влияние концентрации патогенных микроорганизмов, рас-

стояния от устройства, дополнительной органической нагрузки, а также эффективность уничтожения патогенов при защите предметного стекла от прямого источника облучения. Как оказалось, на предметных стеклах постоянное УФ-С излучение позволило достичь большего снижения начального количества микроорганизмов, чем при использовании импульсного излучения ксеноновой лампы. Эффективность обеззараживания постоянным УФ-С излучением была выше, чем импульсным излучателем: для спор *Clostridium difficile* – в 3 раза, для MRSA – на порядок, для VRE – на 3 порядка. Анализ этих результатов (в предположении, что КПД генерации бактерицидного УФ-излучения ксеноновой лампой составляет 10–15 %, что подтверждается многочисленными исследованиями и сертификатами на ксеноновые лампы, выпускаемые мировыми производителями, а энергопотребление установки Tru-D ориентировочно вдвое больше) приводит к выводу, что полученные отличия в эффективности обеззараживания вполне объясняются традиционным механизмом воздействия УФ-излучения на ДНК.

Итак, в случае применения импульсного УФ-излучения для обеззараживания воздуха и поверхностей в помещениях, т. е. при условиях низких уровней облученности на больших расстояниях, у ксеноновых ламп нет никаких преимуществ по сравнению с традиционными ртутными и амальгамными лампами низкого давления [16]. Если же по условиям эксплуатации жестко требуется оборудование без ртути, то импульсное оборудование может обеспечить необходимую бактерицидную эффективность обеззараживания, однако его стоимость высока при относительно низком ресурсе. Окончательный выбор оборудования должен определяться конкретной задачей и экономической целесообразностью.

Фотокатализ

При поглощении УФ-излучения в полупроводнике рождаются свободный электрон и электронная вакансия – дырка. Электрон и дырка на поверхности полупроводника могут вступать в реакцию с молекулами, адсорбированными на поверхности, например, с органическими молекулами, которые могут являться вредными примесями в воде или в воздухе. Кроме этого, на поверхности электроны образуют из молекул воды и кислорода чрезвычайно активные окислители, такие как ион кислорода O^- , радикал OH^\bullet , пероксид водорода и восстановитель – радикал водорода. Дырки обладают чрезвычайно высоким положительным окислительным потенциалом и могут окислять почти все химические продукты. Дырка реагирует либо с водой, либо с любым адсорбированным органиче-

ским (в некоторых случаях и неорганическим) соединением, окисляя его. Радикалы OH^\bullet или O^- также способны окислить любое органическое соединение и многие неорганические соединения, а также микроорганизмы [17, 18].

В качестве фотокатализатора чаще всего используют наночастицы из диоксида титана TiO_2 в кристаллической форме анатаз. Катализаторы могут применяться в виде порошка из нанокристаллов или в виде тонких пленок, нанесенных на стеклянные нити, полимеры или другие поверхности. На поверхности TiO_2 под действием света не только разрушаются органические молекулы, но и гибнут вредные микроорганизмы, даже обладающие высокой сопротивляемостью к ультрафиолету. Помимо проточных устройств для очистки воздуха можно использовать активный TiO_2 и для покрытия стен помещений [18]. В этом случае вся поверхность помещения работает как очиститель воздуха при освещении ее солнечным излучением. Фотокаталитические фильтры довольно часто применяются как дополнительная ступень очистки при кондиционировании воздуха в индивидуальных помещениях.

Несмотря на возможность разложения практически любых примесей, фотокатализ пока не привлекает потребителей для крупномасштабного применения. Основными причинами являются низкая эффективность использования УФ-излучения и деактивация фотокатализатора. Деактивация связана с блокировкой активных центров на поверхности другими веществами, присутствующими в реальных условиях, например, наличие серы может блокировать процессы обеззараживания при фотокатализе. Другой причиной является процесс загрязнения полупроводника либо обычной грязью, либо при осаждении солей или другой неорганики. Поверхность катализатора также может быть «отравлена» или покрыта продуктами распада, которые необходимо удалять, поскольку при этом к активной поверхности катализатора не могут попасть обрабатываемые вещества и УФ-излучение.

Однако фотокаталитические методы будут развиваться, поскольку их привлекательность заключается в том, что для разрушения любых примесей не требуются другие химические вещества, а в случае использования солнечного излучения не требуются и источники УФ-излучения или другое оборудование, причем всегда конечными продуктами разложения являются нетоксичные вещества.

Озонирование

Озонирование по своей природе формально является химическим методом, поскольку исполь-

зается сильный окислитель озон. Но из-за того, что озон является нестабильным соединением, его необходимо синтезировать непосредственно на объекте обеззараживания с помощью электрического разряда. Поэтому такой метод также можно отнести к физическим методам.

Озон является ядовитым веществом, поэтому озонирование помещений возможно только при отсутствии людей, или такой метод применяют в экстренных случаях, или при сильном заражении воздуха и поверхностей. В отличие от других дезинфицирующих веществ, озон не образует ядовитых продуктов и быстро разлагается, поэтому при его применении не требуется дополнительная обработка помещения.

Применение озонаторов для обеззараживания воздушной среды и поверхностей дает неплохие результаты по микробиологии. Однако следует учитывать, что в этом случае необходимая концентрация озона многократно превосходит ПДК в атмосферном воздухе ($0,03 \text{ мг/см}^3$). Это накладывает дополнительные ограничения на способы применения такой обработки, к тому же наличие избыточного озона может привести к образованию в окружающей среде формальдегидов.

Плазма и электрические разряды

В плазме электрического разряда в воздухе образуется большое количество разнообразных высокоактивных веществ (электроны, ионы, радикалы ОН, Н, О, озон, NO, возбужденные атомы и молекулы и др.), которые очищают воздух от примесей и производят дезинфекцию. Для очистки воздуха применяют коронный разряд, высокочастотный и микроволновой, а также импульсный стримерный. Следует отметить, что во многих современных системах фильтрации воздуха кроме механических фильтров используется секция очистки электрическим полем с коронным разрядом. Для дезинфекции и плазменной медицины [19, 20], в основном, применяют барьерный разряд с диэлектриком около высоковольтного электрода [21] или плазменные струи [22], создаваемые разрядами разных типов.

В большинстве случаев поток загрязненного воздуха проходит через зону разряда. Холодные плазменные струи применяют для воздействия на различные поверхности, в т. ч. и при обработке ран в плазменной медицине [23, 24]. Систематических исследований воздействия плазмы на различные микроорганизмы не проводилось, однако сравнительный анализ различных исследований можно сделать. В зависимости от разряда и метода его применения для обеззараживания требуется время от нескольких секунд до нескольких минут.

Эффективность обеззараживания воздуха и поверхностей в зоне разряда выше, чем при воздействии плазменными струями [21]. Возможно, это связано с тем, что в холодной плазменной струе основным механизмом разрушения и гибели микроорганизмов является химическое воздействие радикалами ОН, озоном и другими активными частицами, а в зоне разряда на микроорганизмы дополнительно воздействуют сильные электрические поля, ионы, электроны и электрические заряды, создаваемые на поверхности микроорганизмов в плазме. Поскольку действующих факторов в разряде много и механизмы их воздействия разные, то определению их роли посвящено большое число исследований, например, [25–27].

Наименее исследованы механизмы воздействия сильных электрических полей и электрического заряда на поверхности микроорганизма. В работе [27] рассмотрен механизм разрыва микроорганизма электрическим полем на примере грамотрицательной бактерии *E. coli* и грамположительной *B. subtilis*. Показано, что вследствие разного строения мембран и разной геометрической формы этих микроорганизмов (*у E. coli* есть небольшой кончик, который разорвать легче) необходимая величина потенциала на поверхности *B. subtilis* должна быть в 7 раз выше. Кроме разрыва микроорганизма, возможен процесс электропорации, то есть образования нанопор в мембране, которые также могут приводить к гибели бактерии.

Поскольку воздействие электрическими разрядами многофакторное, то эффективность воздействия разряда на различные микроорганизмы трудно сравнивать с эффективностью воздействия УФ-излучением или химическими веществами. Но учитывая, что инактивация микроорганизмов на поверхностях УФ-излучением не столь эффективна, как для воздуха, можно заключить, что применение разрядов для дезинфекции поверхностей является перспективным и количество таких исследований будет увеличиваться. Возможно, что наиболее эффективным способом дезинфекции поверхностей будет совместное использование электрических разрядов и УФ-излучения, поскольку может оказаться, что микроорганизмы, которые легко инактивируются УФ-излучением, могут быть резистивными к воздействию плазмы и наоборот.

В настоящее время обеззараживание воздуха электрическими разрядами не может конкурировать с УФ-излучением. Причин здесь несколько, начиная с того, что для УФ-излучения известны дозы для большинства патогенов и есть методики его применения, УФ-лампы обладают более высоким ресурсом, при использовании электрических

разрядов необходимо принять меры для удаления озона или других нежелательных веществ, которые могут образоваться в плазме.

Применение импульсных электрических разрядов для обеззараживания воды крайне ограничено. Механизм обеззараживания обусловлен возникновением в воде ударной волны импульсным электрическим разрядом, образованием в воде радикалов ОН и других активных веществ, которые разрушают микроорганизмы. В воде, обработанной импульсными электрическими разрядами, длительное время не происходит развития микроорганизмов, поскольку в воду из электрода переходят ионы материала электрода (меди или железа), которые и угнетают микроорганизмы.

Обеззараживание воды импульсными электрическими разрядами является энергоемким процессом по сравнению с УФ-излучением, при этом в воде образуются ионы металлов, происходит разрушение электродов и камеры дезинфекции, ограничен ресурс разрядников. Поэтому электро-разрядный метод обеззараживания применяется либо в экстремальных ситуациях, когда необходимо срочно подготовить питьевую воду при плохой предварительной очистке, или в тех случаях, когда УФ-излучение неприменимо, например, для дезинфекции соков, сиропов или других непрозрачных жидкостей.

Электропорация в электрическом поле

Электропорацией называют процесс образования нанопор в мембране клетки при воздействии электрического поля. Это явление широко используется в биотехнологии для внедрения макромолекул в клетку через созданные нанопоры, например, ДНК и РНК в клетки млекопитающих, бактерий или растений.

Для создания пор нанометрового размера необходим потенциал на мембране около 1 В [28–31]. Такой потенциал легче создать в том случае, когда клетка находится в проводящем водном растворе или в воде, поэтому процесс электропорации в биотехнологиях проводят при воздействии импульсов высокого напряжения (несколько киловольт) в ячейках с водой при межэлектродных расстояниях 1–2 мм. Если процесс воздействия электрическим полем длится достаточно долго, то размеры пор увеличиваются, и начинается ионный и молекулярный обмен между жидкостью клетки и водным раствором, в результате чего может наступить гибель клетки. Эксперименты показали, что при воздействии импульсами электрического поля с напряженностью 30 кВ/см и длительностью 500 нс в воде происходит уменьшение микроорганизмов (кроме спор) вида *Aspergillus niger*, *Sac-*

charomyces cerevisiae, *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus* и *Pseudomonas aeruginosa* на 3–4 порядка после 300 импульсов [32]. Однако в работе [33] при воздействии на *Bacillus Stearothermophilus* в воде до 40 кВ/см эффекта гибели не было обнаружено, поэтому исследования были проведены до напряженностей 180 кВ/см.

Таким образом, для биотехнологий или медицинских целей достаточны электрические поля несколько кВ/см, однако для обеззараживания или дезинфекции напряженности электрического поля должны быть на порядок больше. Такой способ был испытан для обеззараживания воды [34] с вспененными серебряными электродами, однако он пока не применяется, поскольку используемые электроды из серебра растворяются при прохождении тока, что ведет к их разрушению и к загрязнению воды ионами серебра.

Для процесса электропорации в воздухе требуются более высокие напряженности электрического поля 20–100 кВ/см. Более высокие напряженности электрического поля в воздухе объясняются тем, что в воде потенциал на мембране создается как за счет протекания электрического тока, так и за счет усиления электрического поля в мембране относительно поля в воде, поскольку диэлектрическая проницаемость воды (около 80 при комнатной температуре) намного больше, чем у мембраны (около 7), поэтому напряженность поля в мембране возрастает относительно напряженности внешнего электрического поля. С другой стороны, проводимость воздуха равна нулю, относительная диэлектрическая проницаемость равна 1, поэтому внутри мембраны внешнее электрическое поле ослабевает, и для создания критического потенциала на мембране необходимо увеличивать напряженность внешнего электрического поля. Однако при напряженности электрического поля выше 31 кВ/см происходит пробой воздуха, образуется электрический разряд и плазма, а напряженность электрического поля падает. По этой причине высокую напряженность электрического поля можно создать только в течение короткого времени в импульсном режиме, например, в режиме коронного разряда или без разряда, но при меньших значениях напряженности электрического поля. Следует также отметить, что чем меньше размеры микроорганизма, тем выше должна быть напряженность электрического поля, поскольку поле вытесняется из клетки на мембрану. Соответственно, чем больше размер микроорганизма, тем более высокий потенциал возникнет на мембране, при этом разность потенциалов на всем микроорганизме сопоставима с разностью потенциалов на мембране. Следовательно, для вирусов, размеры которых меньше, чем у бактерий,

напряженности полей для электропорации должны быть выше, и, соответственно, метод должен быть менее эффективным.

Для гибели микроорганизма после создания пор необходим обмен с внешней средой. В случае воды происходит ионный и молекулярный обмен, но в случае воздуха поверхностное натяжение будет препятствовать вытеканию внутриклеточной жидкости, поэтому размер пор должен быть больше. Скорее всего, для гибели микроорганизмов в воздушной среде напряженность электрического поля должна быть столь велика, чтобы происходил разрыв микроорганизма, как было рассмотрено в работе [34], а не просто образование нанопор.

Таким образом, метод электропорации для проведения дезинфекции достаточно хорошо работает в воде, однако его применение для воздуха связано с большими техническими и принципиальными физическими сложностями создания сильных электрических полей. Тем не менее, по мнению авторов работ [35–37], разработанное ими оборудование работает с использованием метода инактивации микроорганизмов в воздухе постоянными электрическими полями.

Согласно этим статьям [35–37] и материалам на сайте фирмы производителя, данная система обеззараживания воздуха работает следующим образом: в зоне инактивации созданы коронные разряды с разной полярностью и производится многократное воздействие на микроорганизмы резко изменяющимися по величине напряженности и градиенту постоянными электрическими полями, а также ионами противоположных знаков, в результате чего происходят необратимые повреждения или полное разрушение микробных клеток. В зоне тонкой фильтрации происходит улавливание обломков разрушенных клеток и других частиц на высокопористых наноэлектродах электростатического осадителя, обладающего большой пылеемкостью. Эффективность фильтрации при этом соответствует фильтрам класса не ниже Н11. Заявлен сверхдолгий нормативный срок службы – не менее 10 лет.

Проанализируем эти работы и это оборудование для обеззараживания воздуха. Конструктивно анализируемая система состоит из нескольких обычных механических фильтров, а также электростатических фильтров, в которых в качестве осадительных пластин используются пластины из вспененного металла (титан или никель) с пористостью PPI30 (осадители), расположенные поперек воздушного потока. Между металлическими пластинами расположены пластины из ретикулированного пенополиуретана толщиной 1 см с пористостью PPI 20, которые служат изоляторами и фильтрами одновременно. Зарядка частиц в возду-

хе производится в коронных разрядах, создаваемых в металлических цилиндрах. При этом внутри каждого цилиндра вдоль оси расположена игла из металла, которая является высоковольтным электродом коронного разряда. Напряжение питания коронного разряда и между металлическими пластинами составляет 4,5 кВ. Конструкция сделана неразборной, поэтому сменить или почистить фильтрующие элементы невозможно.

Рассмотрим возможные механизмы инактивации микроорганизмов в этой системе.

Воздействие активных частиц плазмы в зоне коронного разряда. Зона коронного разряда мала по сравнению с поперечным сечением, поэтому незначительная часть микроорганизмов пройдет через активную плазму. Диаметр иглы с коронным разрядом 0,35 мм, поэтому с течением времени происходит разрушение иглы и запыление конструкции, в результате чего коронный разряд перестанет стабильно гореть. Для инактивации в плазме вне зоны коронного разряда требуются время несколько минут, это хорошо известно из работ по плазменной медицине, которые активно проводятся последние 10–15 лет. Следовательно, секция с коронным разрядом не способна произвести эффективную дезинфекцию прошедшего воздуха. Если бы он был эффективным, то коронный разряд стали бы использовать еще сто лет назад.

Электрический заряд на поверхности микроорганизмов. Этот механизм может работать, однако его эффективность может отличаться для разных типов микроорганизмов на несколько порядков. Для гарантированной зарядки микрочастиц в коронном разряде необходимы сильные электрические поля, однако при расстоянии 1–2 см от высоковольтного игольчатого электрода напряженность электрического поля падает в 20–50 раз, а концентрация ионов при заявленных мощностях установки в этих областях будет также мала. По этим причинам этот механизм будет неэффективным.

При воздействии сильного электрического поля может происходить разрушение оболочки микроорганизмов или проколы мембран (электропорация). Как было указано выше, для электропорации в воздухе необходимы электрические поля 40–150 кВ/см, которые невозможно создать в воздухе, так как прежде произойдет электрический пробой. В данной системе около коронирующего электрода диаметром 0,35 мм напряженность поля будет достигать необходимой величины, но только на очень малых расстояниях от электрода, а на расстоянии 1 см поле уменьшится в 10 раз. Для усиления электрического поля около осадительных металлических пластин от 5 кВ/см до 100 кВ/см и более авторы в своих патентах пред-

лагают на поверхности пластин создавать бугорки с диаметром 30 мкм или меньше (фактически иголки). Однако электрическое поле около таких острий будет быстро спадать на расстояниях порядка их диаметра, поэтому только небольшая часть микроорганизмов может пройти через область усиленного поля. Следует особо отметить, что внутри вспененных металлических пластин электрическое поле будет мало вследствие законов электростатики, а усиление поля внутри пластин из полиуретана будет также слишком мало, поскольку объем диэлектрика меньше, чем объем пор. Разрушение оболочки микроорганизмов в электрическом поле зависит от формы бактерий или спор, например, грамм-отрицательные бактерии *E. coli* хорошо разрушается в электрическом поле, а разрушение спор грамм-положительных *Bacillus subtilis* будет на несколько порядков меньше (отличие может быть на 5 порядков) [27].

Пыль, которая есть в воздухе, будет хорошо оседать около этих острий, поэтому через небольшое время микроострия покроются пылью и микроорганизмы не попадут в область сильного поля. По этим причинам механизм электропорации в представленной конструкции будет работать крайне неэффективно.

Инактивация на поверхности фильтров. Микроорганизмы, осевшие на поверхности фильтров, могут погибнуть за счет малых доз озона, активных частиц из коронного разряда и каталитических свойств поверхности осадительных металлических пластин. Этот механизм представляется наиболее вероятным, однако его эффективность резко снижается при запылении поверхности.

Влияние собираемой пыли. Конструкция этой системы сделана неразборной, поэтому сменить или почистить фильтрующие элементы невозможно. Средняя концентрация пыли в атмосферном воздухе $0,15 \text{ мг/м}^3$, а в местах массового скопления людей допускается до $0,5 \text{ мг/м}^3$. Если исходить из пылеемкости используемых в фильтрующих материалах (пылеемкость ретикулированного ППУ равна 156 г/м^2), при условии, что 50 % пыли осядет на предварительном фильтре, при заявленной эффективности фильтрации равной классу очистки H14 (99,995 %) при запыленности воздуха – $0,5 \text{ мг/м}^3$ фильтры заполнятся за 400–500 часов непрерывной работы. При производительности $130 \text{ м}^3/\text{час}$ и работе 8000 час в год через 10 лет в установке должно накопиться более 5 кг пыли. При таком количестве пыли установка не может эффективно инактивировать микроорганизмы, а накопившаяся пыль вместе с микроорганизмами будет периодически выбрасываться в помещение. Следует отметить, что при накоплении на осадительных электродах слоя пыли на нем накапливается электрический заряд, который будет инициировать периодические пробой этого слоя пыли, что может привести к возгоранию пыли и всего устройства.

Следовательно, данная установка является фактически хорошей фильтровальной системой. Поэтому эффективность удаления микроорганизмов из воздуха будет высокой только на новой установке, а эффективность электропорации будет низкой всегда. Отметим, что по мере запыления эффективность обеззараживания резко упадет. Другими словами, заявленный производителями ресурс нереален.

Таким образом, для инактивации микроорганизмов в воздушной среде методом электропорации или для их разрушения напряженности электрического поля должны существенно превышать значения, при которых происходит электрический пробой воздуха. Поэтому создать необходимое электрическое поле в статическом случае невозможно. Сильные электрические поля в воздухе можно получить только при применении коротких электрических импульсов с длительностью десятки или сотни наносекунд. Такое импульсное оборудование обладает небольшим ресурсом, оно дорогостоящее, для его эксплуатации требуется высококвалифицированный персонал, будут сложности с электромагнитным экранированием такого оборудования для безопасной работы компьютерной техники и персонала. Кроме этого, пока нет достаточной базы данных о требуемых значениях напряженности электрических полей для инактивации всех патогенов.

Создание специальных покрытий

На поверхностях, особенно при повышенной влажности, микроорганизмы могут не только сохраняться длительное время, но и развиваться. Например, грибы и плесень могут активно размножаться на пластике, металлах, сплавах, резине, керамике. В результате жизнедеятельности таких микроорганизмов происходит необратимое разрушение поверхности, а споры микроорганизмов и вредные вещества могут потоками воздуха распространяться на незараженные поверхности. Химическая обработка или дезинфекция поверхностей наиболее эффективна, однако ее применение ограничено или невозможно в замкнутых помещениях при наличии людей. Обработка ультрафиолетовым излучением или плазмой электрического разряда невозможна для закрытых поверхностей, а в случае поверхностей сложной формы требует наличия специальных источников.

Перспективным направлением является создание конструкционных материалов или покрытий

тий, которые могут проявлять собственную биологическую активность к определенным микроорганизмам, в результате чего микроорганизмы на такой поверхности либо гибнут, либо не могут активно размножаться. Такие покрытия могут быть созданы на основе линейно-цепочечного углерода в SP1 гибридизации. Для широкого применения полученных результатов необходимо научиться создавать биологически активные слои на различных классах конструкционных материалов и полимеров.

В настоящее время создана технология конденсации углеродных паров на поверхности для нанесения пленки двумерно-упорядоченного линейно-цепочечного углерода в виде линейных углеродных цепочек, ориентированных нормально к поверхности. Исследования в воздушной среде при высокой влажности показали, что такие углеродные материалы проявляют высокую антимикробную активность в отношении грамположительных микроорганизмов вида *Staphylococcus aureus* и грамотрицательных микроорганизмов вида *Pseudomonas aeruginosa* [38], а также препятствует росту грибов различных видов.

Исследованные углеродные покрытия являются безопасными для человека и могут применяться в местах длительного пребывания людей и в замкнутых помещениях.

Заключение

В настоящее время для эффективного обеззараживания можно применять ряд различных физических методов. Для обеззараживания воды технология УФ-облучения пока является наиболее эффективной, безопасной и экономичной.

Проблема обеззараживания воздуха в местах массового скопления людей становится все более актуальной, поскольку воздушно-капельные инфекции могут распространиться в течение нескольких часов или суток в большинстве развитых стран пассажирами самолетов и скоростных поездов. Вследствие этой угрозы совершенствуются известные методы обеззараживания воздуха и появляются новые. Наиболее эффективной является многобарьерная система очистки и обеззараживания воздуха, включающая как фильтровальные системы, так и системы инактивации микроорганизмов.

За последнее десятилетие значительно повысилась мощность и надежность бактерицидных амальгамных УФ-ламп низкого давления, поэтому метод обеззараживания воздуха УФ-излучением является надежным, простым и эффективным методом. Электрические разряды для дезинфекции воздуха пока применяются редко, а для дезинфек-

ции поверхностей и плазменной медицины использование электрических разрядов представляется перспективным, что подтверждается многочисленными исследованиями во всем мире.

Метод инактивации микроорганизмов в воздухе только электрическими полями сопряжен с техническими и принципиальными сложностями создания сильных импульсных полей, поэтому в ближайшее время маловероятно создание конкурентоспособных промышленных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ультрафиолетовые технологии в современном мире / под ред. Ф. В. Кармазинов, С. В. Костюченко, Н. Н. Кудрявцев, С. В. Храменков. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012.
2. Галина Т. В. // Медицинский алфавит. Эпидемиология и гигиена. 2013. № 2. С. 36.
3. Черненко Т. В., Борисова Л. А., Александрова И. В., Косолапов Д. А. // Медицинский алфавит. Эпидемиология и гигиена. 2013. № 2. С. 30.
4. Голубцов А. А. // Менеджер здравоохранения. 2013. № 3. С. 57.
5. Лапицкий Д. С., Сыроватка Р. А., Василяк Л. М., Филинов В. С., Депутатова Л. В., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 88.
6. Lapitsky D. S., Filinov V. S., Syrovatka R. A., Vladimirov V. I., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Deputatova L. V. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 774. No. 11. P. 012177.
7. Le-Coq L., Bonnevie-Perrier J. C., Andres Y. / Indo-French Indoor Air Quality Seminar, Nantes, June 2010, INDOFROR-012. Available at: <http://www.emn.fr/z-dre/iaq/uploads/INDOFROR-012.pdf> (Accessed 08.10.2015)
8. Вассерман А. Л., Шандала М. Г., Юзбаев В. Г. Ультрафиолетовое излучение в профилактике инфекционных заболеваний. – М: Медицина, 2003.
9. Kowalski W. Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook UVGI for Air and Surface Disinfection. – Heidelberg Dordrecht London New York: Springer, 2009.
10. Василяк Л. М. // Светотехника. 2011. № 5. С. 48.
11. Wekhof A. // PDA J. of Pharmaceutical Science and Technology. 2000. Vol. 54. P. 264.
12. Wekhof A., Trompeter F.-J., Franken O. / The First International Conference on Ultraviolet Technologies, (Washington D.C. USA. June 14–16, 2001) P. 1–15.
13. Gomez-Lopez V. M., Devlieghere F., Bonduelle V., Debevere J. // Journal of Applied Microbiology. 2005. Vol. 99. P. 460.
14. Kireev S., Shashkovskiy S., Grenkova T., Goldshteyn Y., Goncharenko I., Selkova E. / Proceedings of IOA 22-nd World Congress and Exhibition, Ozone and Advanced Oxidation Leading-edge science and technologies (Barcelona, Spain. 2015). No. 18.1.
15. Nerandzic M. M., Thota P., Sankar T., Jencson A., Cadnum J. L., Ray A.J., Salata R. A., Watkins R. R., Donskey C. J. // Infection control & hospital epidemiology. 2014. P. 1.
16. Василяк Л. М., Микаева С. А., Васильев А. И., Костюченко С. В., Сизиков В. П., Крючкова О. Б. // Поликлиника. 2017. № 1–3. С. 50.
17. Photocatalysis: Science and Technology. Ed. by Masao Kaneko, Ichiro Okura – Springer, 2002.
18. Ao C. H., Lee S. C. // Chemical Engineering Science. 2005. Vol. 60. P. 103.

19. Machala Z., Hensel K., Akishev Yu. (Eds.) Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. – Springer: Dordrecht, 2012.
20. Fridman A., Friedman G. Plasma Medicine. – John Wiley & Sons, 2013.
21. Панов В. А., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Дешевая Е. А., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 25.
22. Жданова. О. С., Кузнецов В. С., Панарин В. А., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 36.
23. Ermolaeva S. A., Sysolyatina E. V., Kolkova N. I., Bortsov P., Tuhvatulin A. I., Vasiliev M. M., Mukhachev A. Y., Petrov O. F., Tetsuji S., Naroditsky B. S., Morfill G. E., Fortov V. E., Grigoriev A. I., Zigangirova N. A., Gintsburg A. L. // Journal of Medical Microbiology. 2012. Vol. 61. Issue 6. P. 793.
24. Sysolyatina E., Vasiliev M., Kurnaeva M., Kornienko I., Petrov O., Fortov V., Gintsburg A., Petersen E., Ermolaeva S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. 294002.
25. Lu X., Naidis G. V., M., S. Reuter, Graves D. B., Ostrikov K. // Physics Reports. 2016. Vol. 630. P. 1.
26. Lin A., Chernets N., Han J., Alicea Y., Dobrynin D., Fridman G., Freeman T. A., Fridman A., Miller V. // Plasma Process Polym. 2015. Vol. 12. No. 10. P. 1117.
27. Laroussi M. D., Mendis A., Rosenberg M. // New Journal of Physics. 2003. Vol. 5. P. 41.1.
28. Zimmermann U. // Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol. 1986. Vol. 105. P. 175.
29. Electroporation and Electrofusion in Cell Biology / edited by E. Neumann, A. E. Sowers, and C. A. Jordan. – Springer Science+Business Media, LLC, 1989.
30. The Effects of High Intensity Electric Field Pulses on Eukaryotic Cell Membranes: Fundamentals and Applications / edited by U. Zimmermann. – Boca Raton, FL: CRC, 1996.
31. Weaver J. C. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. Vol. 28. Issue 1. P. 24.
32. MacGregor S. J., Farish O., Fouracre R., Rowan N. J., Anderson J. G. // IEEE Transactions on Plasma Science, 2000. Vol. 28. Issue 1. P. 144.
33. Katsuki S., Mjima T., Nagata K., Lisitsyn I., Akiyama H., Furuta M., Hayashi T., Takahashi K., Wirkner S. // Transactions on Plasma Science. 2000. Vol. 28. Issue 1. P. 155.
34. Liu C., Xie X., Zhao W., Liu N., Maraccini P. A., Sassoubre L. M., Boehm A. B., Cui Yi. // Nano Lett. 2013. Vol. 13. P. 4288.
35. Наголкин А. В., Володина Е. В., Акимкин В. Г., Борисоглебская А. П., Сафатов А. С. // Дезинфекционное дело. 2014. Т. 90. № 4. С. 58.
36. Наголкин А. В., Володина Е. В., Загидулло М. Ф., Акимкин В. Г., Борисоглебская А. П., Сафатов А. С. // Hospital ReNew. 2015. № 10. С. 44.
37. Наголкин А. В., Володина Е. В., Акимкин В. Г., Борисоглебская А. П., Сафатов А. С. // Медицинский алфавит. Эпидемиология и гигиена. 2015. № 6. С. 44.
38. Поликарпов Н. А., Новикова Н. Д., Вальяно Г. Е., Василяк Л. М., Климовский И. И., Печеркин В. Я. // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2010. № 6. С. 53.

PACS: 87.50; 92.60.Sz

Physical methods of disinfection (a review)

L. M. Vasilyak

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

Received February 9, 2018

The basic physical methods of disinfection of air, water and surfaces, such as filtration, ozonation, exposure to ultraviolet radiation, photocatalysis, cold plasma, electrical discharges, electroporation in an electric field are reviewed. The main attention is paid to the consideration of traditional and new methods of air disinfection. Recommendations on application of pulsed UV radiation are given. The possibilities of the electric field application for water and air disinfection are analyzed.

Keywords: disinfection, microorganisms, filtration, UV radiation, electric discharge, photocatalysis, plasma medicine, electroporation.

REFERENCES

1. *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].
2. T. V. Galina, Medical Alphabet (Epidemiology and Hygiene), No. 2, 36 (2013).
3. T. V. Chernen'kaya, L. A. Borisova, I. V. Aleksandrova, and D. A. Kosolapov, Medical Alphabet (Epidemiology and Hygiene), No. 2, 30 (2013).
4. A. A. Golubtsov, Manager of Health Care, No. 7, 57 (2013).

5. D. S. Lapitsky, R. A. Syrovatka, L. M. Vasilyak, V. S. Filinov, L. V. Deputatova, V. I., Vladimirov and V. Ya. Pecherkin, Prikl. Fiz., No. 6, 88 (2015).
6. D. S. Lapitsky, V. S. Filinov, R. A. Syrovatka, V. I. Vladimirov, L. M. Vasilyak, V. Ya. Pecherkin, and L. V. Deputatova, Journal of Physics: Conference Series. **774** (11), 012177 (2016).
7. L. Le-Coq, J. C. Bonnevie-Perrier, and Y. Andres, Indo-French Indoor Air Quality Seminar, Nantes, June 2010, INDOFR-OR-012. Available at: <http://www.emn.fr/z-dre/iaq/uploads/INDOFROR-012.pdf> (Accessed 08.10.2015).
8. A. L. Vasserman, M. G. Shandala, and V. G. Yuzbashev, *Ultraviolet radiation in the prevention of infectious diseases* (Medicine, Moscow, 2003) [in Russian].
9. W. Kowalski, *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook UVGI for Air and Surface Disinfection* (Springer, Heidelberg Dordrecht London New York, 2009).
10. L. M. Vasilyak, Svetotekhnika, No. 5, 48 (2011).
11. A. Wekhof, PDA J. of Pharmaceutical Science and Technology **54**, 264 (2000).
12. A. Wekhof, F.-J. Trompeter, and O. Franken, in *Proc. First International Conference on Ultraviolet Technologies* (Washington D.C. USA. June 14–16, 2001) P. 1–15.
13. V. M. Gomez-Lopez, F. Devlieghere, V. Bonduelle, and J. Debevere, Journal of Applied Microbiology **99**, 460 (2005).
14. S. Kireev, S. Shashkovskiy, T. Grenkova, Y. Goldshteyn, I. Goncharenko, and E. Selkova, in *Proceedings of IOA 22-nd World Congress and Exhibition, Ozone and Advanced Oxidation Leading-edge science and technologies* (Barcelona, Spain. 2015). No. 18.1.
15. M. M. Nerandzic, P. Thota, T. Sankar, A. Jencson, J. L. Cadnum, A. J. Ray, R. A. Salata, R. R. Watkins, and C. J. Donskey, *Infection control & hospital epidemiology*. 2014. p. 1.
16. L. M. Vasilyak, S. A. Mikaeva, A. I. Vasil'ev, S. V. Kostyuchenko, V. P. Sizikov, O. B. Kryuchkova, Poliklinika, No. 1–3, 50 (2017).
17. *Photocatalysis: Science and Technology*. Ed. by Masao Kaneko (Springer, Ichiro Okura, 2002).
18. C. H. Ao, S. C. Lee, Chemical Engineering Science **60**, 103 (2005).
19. *Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*. / Ed by Z. Machala, K. Hensel, and Yu Akishev (Springer: Dordrecht, 2012).
20. A. Fridman and G. Friedman, *Plasma Medicine* (John Wiley & Sons, 2013).
21. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, E. A. Deshevaya, V. Ya. Pecherkin, and E. E. Son, Prikl. Fiz., No. 5, 25 (2017).
22. O. S. Zhdanova, V. S. Kuznetsov, V. A. Panarin, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, and V. F. Tarasenko, Prikl. Fiz., No. 2, 36 (2016).
23. S. A. Ermolaeva, E. V. Sysolyatina, N. I. Kolkova, P. Bortsov, A. I. Tuhvatulin, M. M. Vasiliev, A. Y. Mukhachev, O. F. Petrov, S. Tetsuji, B. S. Naroditsky, G. E. Morfill, V. E. Fortov, A. I. Grigoriev, N. A. Zigangirova, and A. L. Gintsburg, Journal of Medical Microbiology **61** (6), 793 (2012).
24. E. Sysolyatina, M. Vasiliev, M. Kurnaeva, I. Kornienko, O. Petrov, V. Fortov, A. Gintsburg, E. Petersen, and S. Ermolaeva, J. Phys. D: Appl. Phys. **49**, 294002 (2016).
25. X. Lu, G. V. Naidis, M. S. Reuter, D. B. Graves, and K. Ostrikov, Physics Reports **630**, 1 (2016).
26. A. Lin, N. Chernets, J. Han, Y. Alicea, D. Dobrynin, G. Fridman, T. A. Freeman, A. Fridman, and V. Miller, Plasma Process Polym. **12** (10), 1117 (2015).
27. M. D. Laroussi, A. Mendis, and M. Rosenberg, New Journal of Physics **5**, 41.1 (2003).
28. U. Zimmermann, Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol. **105**, 175 (1986).
29. *Electroporation and Electrofusion in Cell Biology* / Edited by E. Neumann, A. E. Sowers, and C. A. Jordan. (Springer Science+Business Media, LLC, 1989).
30. *The Effects of High Intensity Electric Field Pulses on Eukaryotic Cell Membranes: Fundamentals and Applications*. / Edited by U. Zimmermann (Boca Raton, FL: CRC, 1996).
31. J. C. Weaver, IEEE Transactions on Plasma Science **28**, 24 (2000).
32. S. J. MacGregor, O. Farish, R. Fouracre, N. J. Rowan, and J. G. Anderson, IEEE Transactions on Plasma Science **28** (1) 144 (2000).
33. S. Katsuki, T. Mjima, K. Nagata, I. Lisitsyn, H. Akiyama, M. Furuta, T. Hayashi, K. Takahashi, and S. Wirkner, Transactions on Plasma Science **28** (1), 155 (2000).
34. C. Liu, X. Xie, W. Zhao, N. Liu, P. A. Maraccini, L. M. Sassoubre, A. B. Boehm, and Yi. Cui, Nano Lett. **13**, 4288 (2013).
35. A. V. Nagolkin, E. V. Volodina, V. G. Akimkin, A. P. Borisoglebskaya, and A. S. Safatov, Dezinfektsionnoe Delo **90** (4), 58 (2014).
36. A. V. Nagolkin, E. V. Volodina, M. F. Zagidullov, V. G. Akimkin, A. P. Borisoglebskaya, and A. S. Safatov, Hospital ReNew., No. 10, 44 (2015).
37. A. V. Nagolkin, E. V. Volodina, V. G. Akimkin, A. P. Borisoglebskaya, and A. S. Safatov, Medical Alphabet (Epidemiology and Hygiene), No. 6, 44 (2015).
38. N. A. Polikarpov, N. D. Novikova, G. E. Val'vano, L. M. Vasilyak, I. I. Klimovskii, and V. Ya. Pecherkin, Aerospace and Environmental Medicine, No. 6, 53 (2010).