

Опубликованные научные исследования, проведенные по поручению activTek д-ром Джеймсом Марсденом в Государственном университете Канзаса, демонстрируют, что технологии activTek ActivePure® существенно сокращают популяции микробов на поверхностях. Результаты исследования предоставлены исключительно с целью информирования. Результаты исследования не рецензированы Управлением по продовольствию и медикаментам и Агентством по защите окружающей среды или другим государственным учреждением. Наши изделия не являются медицинскими приборами и не предназначены для диагностики, ведения или лечения какого-либо заболевания.

Борьба с загрязнителями в воздухе в помещении

Борьба с аэрозольными загрязнителями в воздухе в помещении: сочетание сокращения концентрации частиц с инактивацией микроорганизмов

СЕРГЕЙ А. ГРИНШПУН,
АТИН АДХИКАРИ, ТАКЕШИ ХОНДА,
КИ ЙОН КИМ, МИКА ТОЙВОЛА,
К.С. РАМЧАНДЕР РАО И
ТИНА РЕПОНЕН

*Центр исследований аэрозолей, связанных с охраной здоровья,
Кафедра здоровья окружающей среды, Университет Цинциннати,
3223 Eden Avenue, PO Box 670056, Cincinnati, Ohio 45267-0056*

Технология очистки воздуха в помещении, сочетающая эмиссию однополярных ионов и фотокаталитическое окисление (активизированные в специально разработанной камере ИКИ), была исследована в двух тестовых камерах объемом 2, 75 м³ и 24,3 м³ с использованием небактериальных и бактериальных испытуемых аэрозолей. Сокращение концентрации частиц измерялось для выбранных размеров частиц в реальном времени, и были определены факторы очистки воздуха и уровень достигнутой очистки воздуха (УДОВ). В процессе испытаний с вирионами и бактериями были собраны и проанализированы образцы биоаэрозолей, и уровень выживаемости микроорганизмов был определен как функция времени. Мы наблюдали, что концентрация аэрозолей снижалась в 10 – 100 раз быстрее при работе очистителя в сравнении с естественным сокращением. Данные показывают, что испытуемый портативный блок, работающий в неветилируемом помещении объемом 25 м³, способен обеспечивать значения УДОВ более, чем в два раза превышающие показатели обычной системы с замкнутым контуром HVAC (Нагрев, вентиляция и кондиционирование воздуха) с восемью фильтрами. Удаление частиц возникало вследствие эмиссии однополярных ионов, тогда как инактивация жизнеспособных микроорганизмов, распространяющихся воздушно-капельным путем, была связана с фотокаталитическим окислением. Приблизительно 90% начального количества жизнеспособных вирусов MS2 было инактивировано в результате воздействия фотокаталитического окисления в течение 10–60 минут. Приблизительно 75% жизнеспособных спор *B. subtilis* было инактивировано за 10 минут, и приблизительно 90% или больше за 30 минут. Были рассмотрены биологические и химические механизмы, которые привели к инактивации устойчивых к неблагоприятным воздействиям вирусов и спор бактерий, распространяющихся воздушно-капельным путем.

Введение

Воздействие на вдыхаемые частицы и микроорганизмы, распространяющиеся воздушно-капельным путем, может вызвать разнообразные проблемы со здоровьем. Были разработаны многочисленные методики с целью снижения частиц в помещении. Ограничения контроля аэрозолей, недостаточная вентиляция пространства при невозможности успешно применить обмен воздуха с фильтрацией, представляют характерную особенность проблемы. Другая проблема – это

снижение в помещении концентрации специфических загрязнителей, распространяющихся воздушно-капельным путем, например, жизнеспособных биологических частиц. В то время как некоторые методики очистки воздуха в помещении направлены исключительно на снижение концентрации аэрозолей, другие разработаны для инактивации жизнеспособных биоаэрозолей (например, вирусов, бактерий и грибов).

Некоторые коммерческие очистители воздуха производят избыточный озон (в качестве первичного биоцидного агента либо побочного продукта); эти приборы вызывают обеспокоенность здравоохранения (1). Среди различных руководств по воздействию озона, для производственной окружающей среды должны быть оговорены следующие критические уровни: 0,2 мг/л в течение 2х часов (2), 0,05 – 0,10 в течение 8ми часов (2), 0,1 мг/л в течение 8ми часов (3) и 0,05 мг/л при мгновенном воздействии (лимит времени не говорен) (4). Для сравнения, стандарт для воздуха вне помещения составляет 0,08 мг/л в течение 8ми часов (5). Озоновые генераторы могут инактивировать жизнеспособные микроорганизмы, однако, инактивация возникает при концентрациях, значительно превышающих стандарты здравоохранения (6,7).

Фотоокисление с использованием УФ-излучения и TiO₂ в качестве фотокатализатора применяется в газовой фазе обезвреживания органических контаминантов (8, 9) и для инактивации микроорганизмов в воде (10 – 12). Были приложены некоторые усилия для исследования его применения для очищения воздуха в системе с замкнутым контуром (13, 14). Исследователи сообщали о значительной инактивации *Serratia marcescens*, устойчивой к неблагоприятным воздействиям, возникающей при циркуляции взвешенных бактерий в капилляре с замкнутым контуром, оборудованном фильтром с TiO₂, в течение относительно длительного периода времени. Pal и др. (15) обнаружили сходные эффекты для *Escherichia coli*, *Mycobacterium sp.*, и *Bacillus subtilis*; Keller и др. (16) сообщали о значительной инактивации *E. coli*, передающейся воздушно-капельным путем, при прохождении через фотореактор, накрытый пленкой с TiO₂. Биоцидный эффект фотокаталитического окисления может быть отнесен на счет фотогенерированных ослаблений валентных зон, гидроксильных радикалов, перекиси водорода и других реактивных соединений кислорода. Lin и Li (17) испытывали изменения жизнеспособности бактерий и грибов, распространяющихся воздушно-капельным путем, подвергшихся воздействию фотоокисления внутри небольшого фотореактора в течение очень короткого времени, около секунды. За такое короткое время существенного сокращения колониеобразующих единиц (КОЕ) не наблюдалось.

Насколько нам известно, данных об эффективности портативных очистителей воздуха на основе УФ/TiO₂ в отношении инактивации жизнеспособных микроорганизмов, распространяющихся воздушно-капельным путем, в окружающей среде вне помещения нет. Эти данные необходимы для оценки возможности фотокаталитического окисления с целью очистки воздуха в жилых помещениях и производственной

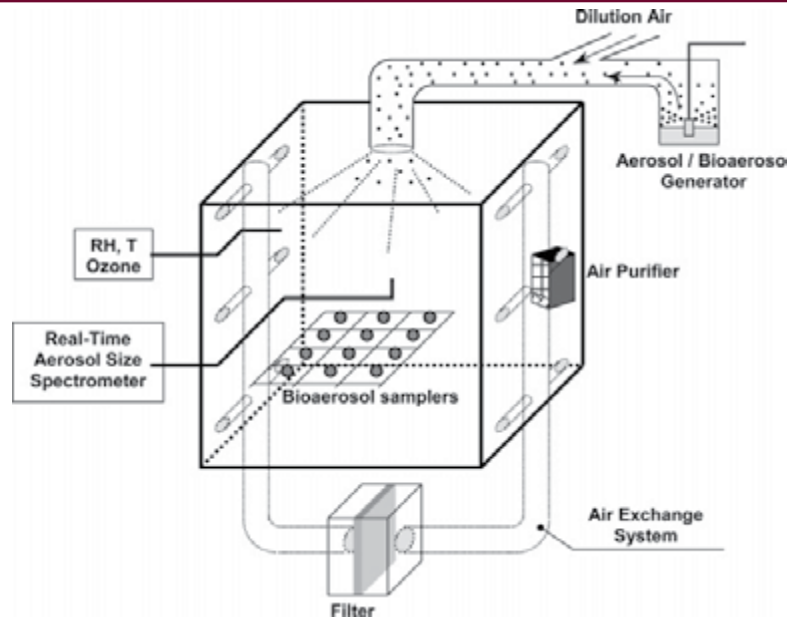


Рисунок 1. Экспериментальная установка.

обстановке. Кроме того, нет достаточного количества информации о гибридных очистителях воздуха, которые используют несколько механизмов очистки воздуха, чтобы провести различия в их эффективности в отношении удаления частиц и биоцидной активности, которые призваны сократить биоаэрозольную нагрузку в воздухе в помещении.

В этом исследовании мы рассмотрели новейшую технологию очистки воздуха, которая совмещает различные механизмы борьбы с аэрозолями/биоаэрозолями: эмиссия однополярных ионов и фотокаталитическое окисление, активизированная технологией «излучающей каталитической ионизации (ИКИ)». Эмиссия однополярных ионов, как было показано ранее, снижает концентрацию частиц в воздухе в помещении (18 – 20), но научных данных об эффективности приборов гибридного типа нет.

Экспериментальная часть

Процесс очистки воздуха в помещении был рассмотрен в экспериментальной установке, изображенной на рисунке 1. Удаление частиц было определено путем измерения концентрации испытуемых аэрозолей с выбранным размером частиц в реальном времени. Также определялся уровень выживших микроорганизмов при тестировании жизнеспособных биоаэрозолей. Были учтены протоколы экспериментов, полученные в наших предыдущих исследованиях (18, 19, 21). Эксперимент проводился, когда свободно расположенный гибридный очиститель воздуха работал внутри камеры, и когда он был выключен. Испытуемый аэрозоль был произведен из жидкой суспензии с использованием небулайзера Collison (BGI Inc., Waltham, MA) и уравновешен по заряду путем прохождения через уравновешивающий заряд механизм 10-м Ci Kr⁸⁵ (3M Company, St. Paul, MN). После перемешивания с чистым, пропущенным через фильтр HEPA (высокоэффективная абсорбция частиц) воздухом при специально поддерживаемой температуре (24 – 26 °C) и относительной влажности (21 – 30 %) аэрозоль поступал в камеру. Спустя 10 – 15 минут настройки для получения однородной концентрации образца аэрозоля был начат эксперимент (t=0).

В большинстве испытаний, концентрация аэрозоля, C, и распределение частиц, ΔC/Δlog(d), были измерены электрическим импактором низкого давления (ELPI, TSI Inc./Dekati Ltd, St. Paul, MN), который использует принцип каскадного столкновения, а также обладает способностью непосредственного считывания для определения концентрации частиц с различными аэродинамическими параметрами в 12 каналах (каждый канал = фаза столкновения), от 0,041 до 8,4 μm (средняя точка). Когда проводились эксперименты с вирусными аэрозолями, содержащими частицы более мелкие, чем нижний предел ELPI, мы использовали широкополосный спектрометр для частиц (ШСЧ; MSP Inc., Shoreview, MN). ШСЧ – это инструмент с высоким разрешением, работающий в реальном времени, совмещающий анализ различной изменчивости, подсчет частиц в конденсате и лазерное рассеивание света для измерения диаметра и концентрации частиц в аэрозоле в диапазоне от 10 нм до 10 μm.

Для каждого определенного размера частицы, d, концентрация аэрозоля в момент времени t=0 была установлена таким образом, чтобы превышать фоновый уровень (вычисленный до того, как был произведен испытуемый аэрозоль) приблизительно в 100 раз. Сначала были получены характеристики естественного снижения концентрации путем записи C_{естественное}(d, t) каждые 10 секунд для ELPI и каждые 2,5 минуты для ШСЧ. Впоследствии, тестовые аэрозоли были произведены и смешаны в камерах снова для достижения одинакового начального уровня концентрации. В момент времени t = 0 очиститель воздуха был включен и концентрация C_{об}(d, t) отслеживалась в течение 120 минут (или до тех пор, пока количество частиц не снижалось ниже предела определения). Для представления в количественной форме эффективности удаления частиц исключительно вследствие работы очистителя воздуха, Фактор очистки воздуха (ФОВ) был определен избирательно как функция времени:

$$\text{ФОВ}(d, t) = \frac{C_{\text{естественное}}(d, t)}{C_{\text{об}}(d, t)} \quad (1)$$

Кроме того, общий уровень удаления частиц был рассчитан по формуле

$$\lambda(d, t) = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{C(d, t = 0)}{C(d, t)} \right], \quad (2)$$

и уровень удаления частиц (УУЧ) (исключительно благодаря очистителю воздуха) был определен согласно кинетики первого порядка как

$$\text{УУЧ}(d, t) = \frac{1}{t} \ln \left[\frac{C_{\text{ОВ}}(d, t = 0)}{C_{\text{ОВ}}(d, t)} \right] - \frac{1}{t} \ln \left[\frac{C_{\text{естественное}}(d, t = 0)}{C_{\text{естественное}}(d, t)} \right] \quad (3)$$

В случае $C_{\text{ОВ}}(d, t = 0) = C_{\text{естественное}}(d, t = 0)$,

$$\text{УУЧ}(d, t) = \frac{1}{t} \ln [\text{ФОВ}(d, t)] \quad (4)$$

Это было необходимо для определения Достигнутого уровня очистки воздуха (ДУОВ), который, согласно АНИС/АПДП (Американский национальный институт стандартов/ Ассоциация производителей для домашнего применения) определяется как

$$\text{ДУОВ}(d, t) = V * \text{УУЧ}(d, t) [\text{м}^3/\text{ч}] \quad (5)$$

Понятие ДУОВ позволяет сравнить эффективность в отношении очистки воздуха свободно расположенного очистителя воздуха и системы вентиляции/фильтрации воздуха с замкнутым контуром (заметьте, что УУЧ является функцией V).

Два небиологических испытуемых аэрозоля, NaCl и дым, были использованы для исследования удаления частиц очистителем воздуха. Размеры генерированных частиц, в основном, находились в диапазоне 0,02 – 2,0 мкм, что включает ультрамелкие и мелкие фракции и представляет большинство известных вирусов и бактерий. Вирус MS2 и споры бактерий *Bacillus subtilis* были основными биологическими испытуемыми аэрозолями. Выборочные эксперименты были проведены с бактериями *Pseudomonas fluorescens*.

Бактериофаг MS2, двадцатигранный безжгутиковый безоболочечный РНК-содержащий колифаг размером 27 нм, относительно устойчивый к неблагоприятным условиям внешней среды, использовался в прошлом в качестве модели большинства вирусов, поражающих млекопитающих, и известен как индикатор энтеровирусов (22 – 26). Исходная суспензия вируса MS2 была приготовлена путем добавления 9мл бульона Лури – Бертани к живым лиофилизированным фагам (ATCC 15597-B1). Эта суспензия была профильтрована с использованием мембранного фильтра с пористостью 0,2 мкм и серийно разведена таким образом, чтобы в распыляемой суспензии содержалось 10^8 – 10^9 БОЕ/мл (БОЕ = бляшкообразующие единицы). Титр фага MS2 был определен согласно модифицированному протоколу оценки колоний Адамса (27); *Escherichia coli* (ATCC 15597, штамм С3000) была использована в качестве организма-хозяина.

B. subtilis – это грамположительная спорообразующая бактерия со спорами в форме палочки шириной приблизительно 0,7 – 0,8 мкм и длиной 1,5 – 1,8 мкм (28). Споры *B. subtilis* предварительно были использованы в лабораторных исследованиях в качестве заменителя устойчивой во внешней среде

патогенной бактерии (29 – 31). Лиофилизированные споры *B. subtilis* (полученные из U.S. Army Edgewood Laboratories, Aberdeen Proving Ground, Maryland) были активированы при температуре 55 – 60°C в течение 25 минут, после чего дважды промыты стерильной дистиллированной водой путем встряхивания после центрифугирования при 7000 оборотов в минуту в течение 7 минут при комнатной температуре. Общая концентрация бактерий была приведена к 10^8 – 10^9 /мл с использованием гемацитометра. Жизнеспособные бактерии были подсчитаны путем культивирования на триптиказном соевом агаре (ТСА) при температуре 30 °C в течение 18 часов; концентрация культуры в распыляемой суспензии находилась в том же диапазоне, что и общая концентрация, т.е. 10^8 – 10^9 КОЕ/мл (КОЕ = колониеобразующая единица). Бактерии *P. Fluorescens* (использованные в выборочных экспериментах) относительно чувствительны к неблагоприятным воздействиям внешней среды. Прежде чем произвести распыление, вегетативные клетки *P. Fluorescens* (ATCC 13525) были культивированы в триптиказном соевом бульоне при температуре 28 °C в течение 18 часов так же, как споры *B. Subtilis*.

В испытаниях с биологическими частицами образцы воздуха были собраны с использованием Пробоотборника Баттона (SKC Inc., Eighty Four, PA), оборудованного желатиновыми фильтрами (SKC Inc.) и работающего при скорости потока 4л/мин в течение 5 минут. Восемь Пробоотборников Баттона были использованы в каждом исследовании, производя один пропуск, один фоновый образец, три образца, взятые в момент времени $t = 0$ и еще три образца, взятые через определенный интервал времени; были протестированы четыре интервала времени: $t = 10, 15, 30$ и 60 минут. Дополнительные выборочные эксперименты были проведены с использованием БиоПробоотборника (SKC Inc., Eighty Four, PA) для сбора *P. Fluorescens* и *B. Subtilis*. БиоПробоотборник эффективно собирает жизнеспособные бактерии (29), тогда как жидкая среда минимизирует неблагоприятное воздействие высушивания. Поскольку размеры его срезов слишком велики для сбора маленьких вирионов MS2, БиоПробоотборник не использовался в качестве альтернативы желатиновым фильтрам для сбора вируса MS2.

Образцы были исследованы на наличие жизнеспособных вирионов, передающихся воздушно-капельным путем (БОЕ) и бактерий (КОЕ) для выражения в количественной форме процента выживших популяций с течением времени t . Этот процент был вычислен при работающем и неработающем очистителе воздуха. Наши предыдущие исследования показали, что работа очистителя воздуха значительно сокращает концентрацию биоаэрозолей в камере благодаря эмиссии ионов. Поэтому, излучатель ионов оказался временно непригодным в гибридной установке при исследовании инактивации вирусов и бактерий, чтобы обеспечить достаточное количество микроорганизмов для определения количества выживших в конце испытания.

Аликвота 200 мкл экстракта растворенного желатинового фильтра была использована для оценки бляшек для определения количества активных

(жизнеспособных) вирионов (БОЕ/мл³), передающихся воздушно-капельным путем. Таким же образом, экстракт был культивирован на чашках Петри с ТСА для получения концентрации жизнеспособных бактерий, передающихся воздушно-капельным путем (КОЕ/мл³).

Было проведено дополнительное исследование с целью определить, действительно ли биоцидный эффект очистителя воздуха имеет место в аэрозольной фазе (а не после сбора микроорганизмов в фильтре). С этой целью, распыленные микроорганизмы были собраны в восьми желатиновых фильтрах в течение 5 минут в камере без очистителя воздуха. Четыре фильтра были исследованы на наличие жизнеспособных микроорганизмов непосредственно после этого исследования, тогда как оставшиеся четыре подверглись воздействию очистителя воздуха в камере в течение 10, 15, 30 и 60 минут, а затем исследованы. Сравнение двух наборов позволило определить, возникает ли инактивация микроорганизмов в фильтрах в процессе сбора.

Уровень озона и концентрация ионов в воздухе были отслежены в реальном времени в камере с использованием озонового монитора (PCI Ozone & Control Systems, Inc., West Caldwell, NJ) и счетчика ионов воздуха (AlphaLab Inc., Salt Lake City, UT), соответственно. Температура воздуха в испытываемой камере составляла 24±2 °C, и уровень относительной влажности от 22±2 % до 28±2 %, что было отслежено с помощью термо/гигрометра (Fischer Scientific Co., Pittsburgh, PA).

Прототип очистителя (Ecoquest International Inc., Greenville, TN), использованный в исследовании, использовал излучатель ионов и специально разработанную камеру ИКИ. Модель выпускает отрицательно заряженные ионы в воздух в помещении, где они достигают распыленных частиц. Важно заметить, что этот метод отличается от очистки воздуха путем сообщения заряда частицам на входе очистителя и последующим сбором их на металлические электроды путем электростатической преципитации. Камера ИКИ сконцентрирована на непрерывно оптимизирующейся целевой структуре, включающей матрицы продолговатых трубчатых элементов, сделанных из поликарбоната и расположенных параллельно на противоположных сторонах или альтернативно на четырех сторонах широкополосных источника УФ света. В ультрафиолетовой лампе использован газообразный аргон с ртутными и карбидными нитями накаливания со спектром излучения 100 – 367 нм. Кроме того, было использовано покрытие целевой структуры камеры, включающее гидрофильные свойства и содержащее следующие группы материалов: диоксид титана, родий, серебро и медь. В результате, фотокаталитическое окисление формирует реактивные соединения, такие как гидроксильные радикалы, разрывы валентных зон, супероксидные ионы и перекись водорода.

Испытания проводились в двух тестовых камерах, предназначенных для эксплуатации в помещении, включая большую камеру с отдельным входом (24,3м³), которая имитировала жилое помещение, и меньшую камеру (2,75м³), которая имитировала ограниченное пространство (например, ванную комнату, небольшое офисное помещение или кабину автомобиля). Было исследовано удаление

частиц в обеих камерах, тогда как испытания жизнеспособности биоаэрозолей были проведены в меньшей камере, сделанной из нержавеющей стали и дающей возможность био-деконтаминации. Очиститель воздуха испытывался в неветилируемых камерах (без обмена воздуха), поскольку известно, что портативные очистители воздуха применяются, главным образом, в плохо вентилируемых пространствах (20,21). Обмен воздуха присутствовал только при испытании системы вентиляции/фильтрации воздуха с замкнутым контуром, оборудованной фильтром HVAC для сравнения его производительности с производительностью портативного очистителя воздуха в сроки ДУОВ. Система вентиляции/фильтрации воздуха также включалась для очистки тестовых камер между экспериментами. В большинстве экспериментов, очиститель воздуха работал в углу камеры, с лицевой частью, обращенной к центру. Отдельный эксперимент был проведен с целью изучить, влияет ли его расположение и ориентация на ФОВ.

Результаты и обсуждение

Удаление частиц из воздуха. На рисунке 2 показано изменение распределения концентрации и размера частиц аэрозоля NaCl при работе очистителя воздуха в большой тестовой камере. Как можно увидеть на этом примере, концентрация распыленных частиц размером 0,1µм сократилась в 28 раз в течение 1 часа и в 250 раз в течение 2 часов; соответствующее сокращение частиц размером 1µм составило 10 и 50 раз. При эксперименте с частицами дыма концентрация аэрозоля снижалась даже еще быстрее. Снижение верхних уровней концентрации аэрозолей оказалось значительно большим, чем предварительно рассчитанное на основании данных подвижных или неподвижных моделей естественного снижения (32). Эти результаты были получены при одновременной работе в установке излучателя ионов в воздухе и камеры ИКИ. Любопытно, что статистически такой же эффект сокращения частиц (p > 0,05) наблюдался при выключенной камере ИКИ и работающем только излучателе ионов. Дальнейшие результаты свидетельствуют о том, что удаление частиц было достигнуто в результате эмиссии однополярных ионов, а не вследствие фотокаталитических реакций.

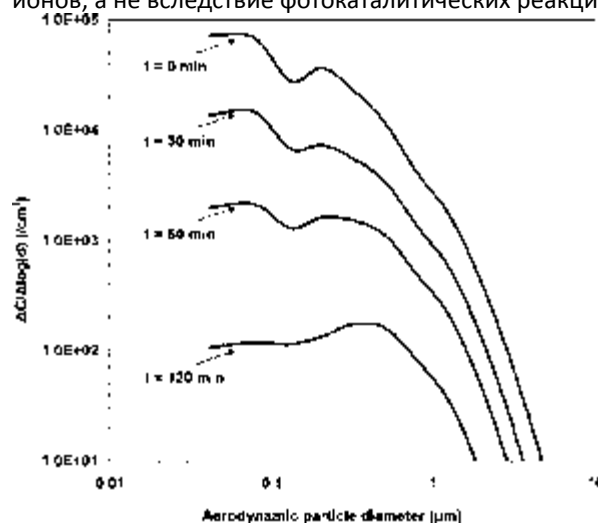


Рисунок 2. Концентрация частиц и распределение размеров распыленного NaCl согласно измерениям ELPI в камере объемом 24,3 м³ с работающим

очистителем воздуха, расположенным лицевой поверхностью к центру на удалении 1,7 м от точки измерения. Вентиляция в камере отсутствует. Изначальная концентрация аэрозоля = $1,5 \cdot 10^5 / \text{см}^3$.

Этот результат согласуется с опубликованными данными о влиянии однополярной ионизации воздуха на концентрацию частиц, распространяющихся воздушно-капельным путем (18 – 21). Очистка воздуха частично эффективна при высоких начальных концентрациях ($> 10^4$ частиц/см³), что обеспечивает адекватное взаимодействие между ионами в воздухе и распыленными частицами. Как упоминалось выше, ожидается, что эффект будет гораздо более выраженным в неветилируемой среде, чем в вентилируемой. Сокращение концентрации аэрозолей было особенно значимым для частиц диаметром $\leq 0,3$ мкм. Например, при постоянной работе очистителя воздуха с выходом ионов приблизительно 10^{12} е/сек в углуба камеры объемом 24,3 м³ с лицевой частью, обращенной к центру, в течение 2х часов, ФОВ составил приблизительно 30 – 70 для частиц диаметром 0,08 – 0,3 мкм и приблизительно 13 – 16 для частиц диаметром 0,8 – 2 мкм (в испытаниях, проведенных с NaCl и дымом в качестве испытуемых аэрозолей). Такие же уровни ФОВ могут быть получены более быстро в помещении меньшего объема и менее быстро в большем пространстве. Экспериментальные направления подтверждают ион-индуцированную модель удаления аэрозолей.

Было выявлено, что ФОВ зависит не только от времени работы и размера частиц, но также от расположения/ориентации очистителя в камере. Например, угловое расположение с лицевой частью, обращенной к центру комнаты, было признано более предпочтительным, чем противоположная ориентация с лицевой частью, обращенной к стене. Различия в ФОВ, полученных при угловой и центральной локализации, были значительными и усиливались при увеличении времени работы. Затемненные участки на рисунке 3 представляют ион-индуцированный Фактор очистки воздуха, когда данные по частицам выбранной величины были объединены путем измерения размеров частиц NaCl до 2,5 мкм и распределения по трем выбранным местам расположения/ориентациям в камере объемом 24,3 м³: в углу с лицевой частью, обращенной к центру, в центре и в 80 см от стены с лицевой частью, обращенной к стене.

На рисунке 4 представлены значения УДОВ, полученные при работающем очистителе воздуха, для пяти выбранных размеров частиц NaCl и дыма, взятых в качестве распыленных загрязнителей в неветилируемой камере объемом 24,3 м³. Диапазон УДОВ составлял приблизительно от $42,1 \pm 0,1$ до $62,1 \pm 1,8$ м³/час для частиц NaCl диаметром 0,04 – 1,99 мкм, и от $72,4 \pm 0,9$ до $115,5 \pm 10,8$ м³/час для частиц дыма того же размера. Разница может быть отнесена на счет различной способности частиц NaCl и дыма перенимать электрические заряды от ионов в воздухе, что приводит к различиям в их подвижности и, следовательно, различной скорости их перемещения. Приведенное выше объяснение, что эмиссия однополярных ионов является основным механизмом, обеспечивающим сокращение концентрации частиц, выглядит обоснованным.

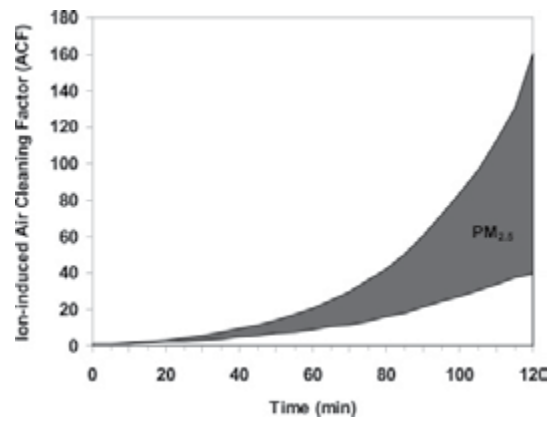


Рисунок 3. Ион-индуцированный Фактор очистки воздуха (ФОВ) для частиц NaCl размером до 2,5 мкм согласно измерениям ELPI и распределение по трем выбранным местам расположения и ориентациям очистителя воздуха в камере объемом 24,3 м³. Вентиляция в камере отсутствует. Изначальная концентрация распыленных частиц размером до 2,5 мкм = $(0,356 - 1,50) \cdot 10^5 / \text{см}^3$.

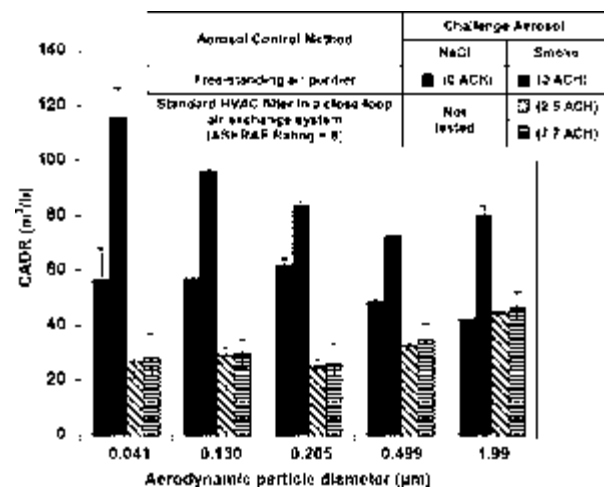


Рисунок 4. Достигнутый уровень очистки воздуха (ДУОВ), определенный для распыленного NaCl и дыма согласно измерениям ELPI в неветилируемой камере объемом 24,3 м³. Производительность очистителя воздуха в сравнении со стандартным фильтром HVAC (рейтинг ASHRAE = 8), установленным в камере с системой обмена воздуха с замкнутым контуром.

Кроме того, на рисунке 4 представлены значения ДУОВ, полученные в системе обмена воздуха с замкнутым контуром, оборудованной по стандарту рейтинга ASHRAE

восемью фильтрами HVAC с двумя скоростями обмена воздуха, 2,5 и 7,7 АСН (обменов воздуха в час). Данные показывают, что испытуемый портативный очиститель воздуха, работающий в неветилируемом помещении объемом приблизительно 25 м³, способен обеспечить ДУОВ больше, чем в два раза значительнее, чем обычная центральная система HVAC с восемью фильтрами. Очевидно, более эффективные фильтры для частиц обеспечивают более быстрое сокращение распыленных загрязнителей и их производительность может быть лучшей, чем у испытуемого очистителя воздуха. Например, по сравнению с портативной установкой, фильтр HEPA, установленный в системе обмена воздуха с замкнутым контуром в камере объемом 24,3 м³, может обеспечить приблизительно в

4 и 3 раза выше ДУОВ при 2,5 и 7,7 АСН, соответственно, при испытании с частицами NaCl, и в 2,2 – 1,4 раза выше при испытаниях с частицами дыма. Однако, фильтры HEPA редко используются в жилых центральных системах HVAC по причине больших перепадов давления и влияния нагрузки на его работу.

Удаление частиц из воздуха в помещении с применением технологии гибридной очистки воздуха было также исследовано в меньшей камере объемом 2,75 м³, которая иным способом была использована сначала для оценки инаktivации жизнеспособных микроорганизмов. Значения ДУОВ, полученные для вирионов MS2 из измерений WPS, составили 73 ± 5 м³/час, что составляет уровень ДУОВ, полученный для частиц NaCl и дыма в большой камере для размеров вируса. Это предполагает целесообразность применения небиологических частиц для определения ион-индуцированного сокращения аэрозолей с биочастицами в таком же диапазоне размеров. Кроме того, этот результат подразумевает, что, по крайней мере, для диапазона частиц, охватывающего вирионы MS2, УУЧ вследствие эмиссии ионов в воздухе в помещении обратно пропорционален объему воздуха (см. уравнение 5).

ТАБЛИЦА 1. Процент микроорганизмов, распространяющихся воздушно-капельным путем, выживших в момент времени t в камере объемом 2,75 м³ с работающей в ней камерой ИКИ, как измерение количества БОЕ (для вируса MS2) или количества КОЕ (для эндоспор *Bacillus subtilis*)^a

Время экспозиции, t (мин)	Процент микроорганизмов, распространяющихся воздушно-капельным путем, выживших в камере с очистителем воздуха, работающим в течение времени t	
	Вирус MS2, [БОЕ/см ³] _t / [БОЕ/см ³] _{t=0}	Эндоспоры <i>Bacillus subtilis</i> , [КОЕ/см ³] _t / [КОЕ/см ³] _{t=0}
10	9,3 ± 2,0 (n=5)	24,1 ± 3 7 (n=2)
15	9,2 ± 4,3 (n=12)	15,7 ± 1,7 (n=3)
30	8,3 ± 1,1 (n=8)	7,9 ± 1,1 (n=3)
60	10,3 ± 1,7 (n=5)	10,1 ± 1,3 (n=3)

^a Образец биоаэрозоля был пропущен через Пробоотборник Баттона, оборудованный желатиновыми фильтрами. n = количество повторов.

Озон. В обеих испытуемых камерах (не вентилируемых) концентрация озона поэтапно увеличивалась, поскольку очиститель постоянно работал. В камере объемом 24,3 м³ она возросла с 0,006 до 0,05 мг/л в течение приблизительно 35 минут, тогда как в меньшей камере (2,75 м³) то же самое увеличение произошло в течение приблизительно 5 минут. Тем не менее, при однократном применении проветривания (не более 1 АСН), концентрация озона в камере объемом 24,3 м³ существенно не увеличивалась по сравнению с начальным уровнем (p > 0,05). Наши данные мониторинга, полученные при работе испытуемой установки в невентилируемом помещении объемом приблизительно 100 м³ (здесь не представлены) показывают, что уровень озона может поддерживаться ниже 0,05мг/л при непрерывной многочасовой работе установки. Некоторые очистители воздуха, использующие

эмиссию ионов и, для увеличения диапазона воздействия, фотокаталитическое окисление, могут обусловить более сильное возрастание озона в помещении, чем полученное в эксперименте. Использование таких приборов в ограниченном воздушном пространстве может не подходить, поскольку их продолжительная работа может привести к чрезмерному повышению уровней озона и, в случае присутствия некоторых химических соединений, образовывать наночастицы (33). Несмотря на то, что эмиссия однополярных ионов обладает свойством подавлять этот эффект, представляется важным поддерживать уровень озона ниже существующего порога опасности. Мы верим, что решение может быть найдено в применении прерывистого режима работы (в качестве альтернативы постоянному), что позволит очистителю воздуха работать до момента, когда озон достигнет определенного уровня, после чего озон-продуцирующий элемент автоматически выключается, чтобы позволить концентрации озона снизиться; после этого цикл может повториться.

Инаktivация микроорганизмов. В таблице 1 приведены данные о результатах инаktivации микроорганизмов. Только около 10% изначального количества жизнеспособных вирионов MS2 выжило после 10 – 60 минут работы очистителя в камере, а около 90 % было инаktivировано. Когда естественное снижение концентрации распыленного MS2 в камере было прослежено (при неработающем очистителе), мы обнаружили, что концентрация активных вирусов оставалась относительно стабильной: сокращение не превышало 20,3 ± 0,9 % в течение 1 часа. Данные показали, что инаktivация вируса произошла довольно быстро, хотя процент выживших вирионов не показал зависимости от времени экспозиции при t = 10 – 60 минут. Таким образом, небольшого количества времени может быть достаточно для снижения процента жизнеспособных вирусов в воздухе на фактор 10, тогда как выжившие вирусы продемонстрировали значительную устойчивость к продолжительному воздействию неблагоприятных условий. При воздействии на распыленные вирионы фотокаталитического окисления, гидроксильные радикалы могут повреждать белок капсида и рецепторы, таким образом, приводя к неспособности вируса последовательно взаимодействовать с организмом-хозяином и формировать БОЕ (34). Кроме того, фотокаталитическая камера с TiO₂ может оказывать окислительное повреждение на вирусный капсид (35), и радикалы могут обусловить повреждение генетического материала вируса (36, 37). Наши результаты показали, что гибридный очиститель воздуха можно применять продолжительно в течение коротких интервалов времени для достижения существенного уровня инаktivации вирусов. С другой стороны, продолжительное время работы очистителя воздуха представляется более предпочтительным в среде с постоянным поступлением «свежих» активных вирионов.

Приблизительно 75% спор *B. subtilis* в воздухе, подвергшихся воздействию очистителя воздуха, были инаktivированы в течение первых 10 минут, 85% - в течение первых 15 минут, и 90% или более – через 30

минут (таблица 1). При экспозиции от 30 до 60 минут мы не наблюдали существенного снижения количества выживших спор (подобно тенденции, обнаруженной для вирионов), что показывает нелинейность эффекта. Естественное снижение количества культур не было существенным ($p > 0,05$) в течение 1 часа, что было измерено Пробоотборником Баттона, оборудованным желатиновыми фильтрами. тем не менее, общее стандартное отклонение в данных, полученных в этих контрольных испытаниях, было выше, чем 58%, и количества КОЕ были близки к границе определения. С целью изучить этот результат, мы измерили естественное снижение жизнеспособных спор *B. Subtilis* БиоПробоотборником в момент времени $t = 0$ и $t = 2$ часа. Это подтвердило, что, при отсутствии очистителя воздуха, выживаемость сохранялась на постоянном уровне с колебаниями $\pm 20\%$.

В случае с бактериями, процесс инактивации гидроксильными радикалами может протекать по пяти путям:

- окисление коэнзима А, что приводит к подавлению клеточного дыхания и гибели клетки (38);
- разрушение наружной мембраны бактериальной клетки (12);
- окисление ненасыщенных фосфолипидов в мембране бактериальной клетки (39);
- вытекание внутриклеточных ионов K^+ (11); и
- повреждающее влияние на ДНК и РНК (36, 37).

Одной из причин того, что инаktivация эндоспор *B. Subtilis* оказалась зависимой от времени, является их тонкий слой мембраны, содержащий пептидогликаны. Это согласуется с исследованиями Matsunaga и др. (40), которые обнаружили, что фотоокисление коэнзима А фотокатализатором с TiO_2 не было достаточно эффективным в отношении инаktivации *Chlorella vulgaris* в воде по причине ее более толстой клеточной стенки. Некоторые другие механизмы защиты бактерий против неблагоприятного воздействия окисления, включая синтез ферментов супероксиддисмутаза, также могут замедлять процесс инаktivации (41).

Несмотря на то, что время играло роль в инаktivации спор бактерий, потеря жизнеспособности произошла достаточно быстро как для вируса MS2, так и для *B. Subtilis*. Это может происходить за счет быстрого взаимодействия слабых мест валентных зон (h^+)($TiO_2 + h\nu \rightarrow h^+ + e^-$) с органическими субстанциями, которые присутствуют на наружной стенке или мембране вирусов и бактерий. Вероятно, вышеупомянутое взаимодействие возникает прежде, чем в воздух поступает значительное количество гидроксильных радикалов (ОН). Хотя предыдущие исследования (11, 12) подчеркивают роль гидроксильных радикалов ($H_2O + h^+ \rightarrow OH + H^+$), эти радикалы не могут выступать первичным фактором в инаktivации микроорганизмов, в том числе, и в воздухе. Более того, поскольку наши эксперименты проводились при относительно сухом воздухе ($ОВ < 30\%$), молекулы воды не являлись ведущим соединением при контакте с катализатором, поэтому значение гидроксильных радикалов было значительно меньшим, чем в жидкостях. Shang и др. (9) пришли к заключению, что в газообразном состоянии органические соединения, такие как гептан, могут

легко взаимодействовать с фотогенерированными ослаблениями, тогда как взаимодействие с молекулами парообразной воды не было настолько же значимым. Alberici и Jardim (8) сообщали, что слабые места валентных зон, созданные фотоокислением с TiO_2 , способны окислять любое органическое соединение. В процессе также производится перекись водорода ($O_2 + e^- \rightarrow O_2^{\bullet-}$; $O_2^{\bullet-} + H^+ \rightarrow HO_2^{\bullet}$; $2 HO_2^{\bullet} \rightarrow O_2 + H_2O_2$), которая может свободно проникать в клеточную мембрану и стенку и приводить к инаktivации микроорганизмов (42). Дальнейшие биохимические исследования значения газовой фазы окисления TiO_2 микроорганизмов, распространяющихся воздушно-капельным путем, также как исследование кинетических реакций в аэрозольной фазе, представляются целесообразными для дальнейшего изучения вышеизложенных объяснений.

Эксперименты с *P. fluorescens* позволили выявить количества КОЕ, находящиеся ниже пределов обнаружения, как в экспериментальных, так и в контрольных образцах. В отличие от эндоспор *B. Subtilis*, даже короткая экспозиция на воздухе из внешней среды ($ОВ < 30\%$) значительно снизила жизнеспособность распыленных вегетативных клеток *P. fluorescens*, которые, как известно, являются чувствительными к неблагоприятным воздействиям. Вероятно, микроорганизмы, чувствительные к неблагоприятному воздействию высушивания, более пригодны для этого вида испытаний, если испытания проводятся при более высоких уровнях относительной влажности.

Были проведены дополнительные контрольные эксперименты с целью исследовать, возникает ли снижение жизнеспособности вируса MS2 и спор *B. Subtilis* в аэрозольной фазе, или на фильтре пробоотборника. Для MS2 мы обнаружили, что при культивировании необработанных и обработанных в течение 10 минут желатиновых фильтров было выделено 1835 ± 270 БОЕ/мл и 1855 ± 325 БОЕ/мл, соответственно. Для *B. Subtilis* мы обнаружили, что при культивировании необработанных и обработанных в течение 60 минут желатиновых фильтров было выделено 1770 ± 275 КОЕ/мл и 1125 ± 410 КОЕ/мл, соответственно. При экспозиции без распыления значительных изменений жизнеспособности вирусов или бактерий не возникло ($p > 0,05$). Таким образом, эти результаты подтверждают, что инаktivация бактерий и вирусов, наблюдаемая в наших исследованиях, действительно возникает в аэрозольной фазе и не связана с инаktivацией на фильтрах.

Сочетанное влияние (подсчет образцов). Был сделан вывод, что удаление частиц имеет место быть исключительно благодаря эмиссии однополярных ионов, тогда как инаktivация жизнеспособных вирионов MS2 и спор *B. Subtilis*, распространяющихся воздушно-капельным путем, происходила благодаря фотокаталитической реакции, катализированной камерой ИКИ. Оба механизма, работающие одновременно в очистителе воздуха гибридного типа, могут привести к значительному сокращению присутствующих в помещении жизнеспособных распыленных биоагрессивных агентов. Озон, производимый камерой ИКИ, не представляется способным привести

к значительной инактивации микроорганизмов, поскольку его уровень недостаточно высокий. Tseng и Li (43) упоминали, что уровня 3,43 мг/л достаточно для вируса MS2, распространяющегося воздушно-капельным путем, но Li и Wang (44) не наблюдали никакой инактивации спор *B. Subtilis*, распространяющихся воздушно-капельным путем, даже при концентрации O_3 20 мг/л.

На основании экспериментальных данных, полученных в этом исследовании, были сделаны следующие заключения. Исходя из того, что ион-индуцированная очистка воздуха удаляет около 80% жизнеспособных патогенных микроорганизмов, распространяющихся воздушно-капельным путем, из воздуха помещения за 30 минут, а ИКИ-индуцированное фотоокисление оставляет жизнеспособными только 10% оставшихся микроорганизмов, общая аэрозольная нагрузка в этом помещении за 30 минут сокращается приблизительно на фактор 50.

Наблюдаемая быстрая инактивация микроорганизмов позволяет обойтись без постоянной работы камеры ИКИ. Данные показывают, что ее можно использовать «порционно» в течение 10 – 30 минут, оставляя «в покое» на 1 – 2 часа до достижения исходного уровня озона (предлагаемый выше прерывистый режим), тогда как эмиссия ионов может происходить постоянно для поддержания снижения концентрации аэрозоля.