

Могут ли мобильные очистители воздуха эффективно снизить риск непрямого заражения SARS-CoV-2 при вдыхании аэрозолей?

Кристиан Й. Келер, Томас Фукс, Райнер Хайн
Мюнхенский институт механики жидкостей и
аэродинамики университета Бундесвера,
Вернер-Хайзенберг-Вег 39
85577 Нойбибериг

Обзор

Глобальное распространение инфекции SARS-CoV-2 показало, что пандемия только начинается и ее невозможно остановить. Масштабная вакцинация населения мира для борьбы с распространением вируса будет невозможна даже при наличии эффективной и хорошо переносимой вакцины. В связи с этим необходимо найти технические решения для борьбы с пандемией. Маски, закрывающие нос и рот, в настоящее время являются широко распространенными и общепринятыми средствами, позволяющими снизить прямой риск заражения во время дыхания, говорения, пения, кашля и чихания. Непрямое заражение инфекционными аэрозольными частицами, которые со временем накапливаются в окружающем воздухе, нельзя предотвратить с помощью гигиенических масок для рта и носа [5]. Для этого необходимы фильтрующие респираторы, задерживающие мельчайшие частицы. В качестве альтернативы можно добиться очистки аэрозольных частиц в помещении путем фильтрации или удалить их с помощью проветривания. Системы вентиляции, надежно улавливающие аэрозольные частицы диаметром менее 1 мкм, встречаются довольно редко. Обычное проветривание путем открытия окон зачастую неэффективно; кроме того, применять его зимой, без потерь энергии, не ставя под угрозу здоровье и комфорт людей невозможно. Поэтому вопрос заключается в том, смогут ли мобильные очистители воздуха в значительной степени снизить риск заражения? Чтобы ответить на этот вопрос, был проведен системный анализ применения очистителя воздуха TROTEC TAC V+ с расходом до 1500 м³/ч в помещении. Устройство имеет комбинацию фильтров, которая гарантирует удаление аэрозольных частиц диаметром от 0,1 до 0,3 мкм из воздуха помещения на 99,995%. Результаты исследования показывают, что концентрация аэрозоля в помещении размером 80 м² может быть уменьшена до небольшого количества за короткий промежуток времени. Таким образом, применение в помещениях очистителей воздуха с большим объемным расходом и высококачественными фильтрами класса H14 представляют собой, на наш взгляд, очень разумное техническое решение, позволяющее значительно уменьшить риск непрямого заражения при вдыхании аэрозолей в школах, офисах, магазинах, залах ожидания, общественных помещениях, клубах, салонах, столовых и т.д. Однако их также можно использовать и в зданиях с вентиляционными системами, где возможны скопления людей (зона ожидания, рабочая зона), или где вследствие высокой рабочей нагрузки выделяется большое количество аэрозоля (фитнесс-студия).

1. Введение

Согласно современным исследованиям, инфекция SARS-CoV-2 передается, в основном, капельным путем во время дыхания, говорения, пения, кашля или чихания [1, 2, 3, 4]. *Прямое* заражение, при котором выделяемые капли вдыхаются здоровым человеком на малом расстоянии (менее 1,5 м), можно предотвратить с помощью фильтрующих респираторов (класс защиты FFP2/3 или выше), так как эти респираторы надежно задерживают вдыхаемые и выдыхаемые частицы в соответствии с указанным классом [5]. Таким образом, такие респираторы обеспечивают очень хорошую индивидуальную защиту даже при невозможности соблюдения необходимой социальной дистанции. Использование респираторов способствует тому, что вирусные частицы, выдыхаемые инфицированными людьми, почти не попадают в воздух помещения. Поэтому, помимо индивидуальной защиты, они также обеспечивают защиту окружающих от прямого и непрямого заражения, при условии, что респиратор не снабжен выпускным клапаном.

Более крупные капли также эффективно задерживаются обычными повязками (масками) для рта и носа. Поскольку крупные капли могут статистически переносить больше вирусов, чем мелкие, защитный эффект повязок (масок) распространяется на естественные процессы организма, при которых выделяются крупные капли (кашель, чихание). Тем не менее, небольшие капли попадают в окружающий воздух через зазоры по краям этих повязок для рта и носа, потому что, с одной стороны, эти повязки недостаточно плотно прилегают к лицу, а с другой стороны — значительная часть воздушного потока идет по пути наименьшего сопротивления [5]. Благодаря сопротивлению обтекания, а также благодаря потере напора при отклонении воздушной струи повязок (масок) для рта и носа, небольшие капли в течение некоторого времени остаются в области головы. В результате этого кратковременное распространение капель при разговоре, пении, кашле или чихании достаточно ограничено, а прямой риск заражения снижается в значительной степени [5, 6, 7, 8, 9]. Однако эти повязки эффективно защищают только при условии дополнительного соблюдения безопасной дистанции (не менее 1,5 м). Поскольку при ношении повязок (масок) высвобождаются мелкие капли, то со временем возможно их накопление в помещении, что может привести к *непрямому* инфицированию, даже если инфицированный человек более не находится в помещении [8, 10].

Мелкие капли, способные оставаться в окружающем воздухе на протяжении нескольких часов, могут переноситься вместе с воздушным потоком на большие расстояния. Эти капли называются аэрозольными частицами или взвешенными частицами, а смесь воздуха и аэрозольных частиц называется аэрозолем. Научно доказано, что содержащий вирусы аэрозоль способен привести к инфицированию COVID-19 до тех пор, пока не произойдет полное испарение жидкой фазы аэрозольных частиц [11, 12]. Время испарения водных аэрозольных частиц диаметром в несколько микрон составляет менее одной секунды при умеренной влажности [6]. Однако при высокой относительной влажности (около 85%) скорость испарения может быть равна скорости конденсации, поэтому содержание жидкой фазы остается на одном уровне. В таких случаях вероятность заражения ограничена только периодом полураспада вируса. Период полураспада вируса SARS-COV-2 составляет 1,1 - 1,2 часа, т.е. по прошествии 1 часа половина вирусов в капле статистически не будет представлять риск инфицирования [11]. Вопрос о том, представляют ли частицы аэрозоля риск инфицирования после испарения жидкой фазы, все еще является предметом споров в

настоящее время [13, 14, 15]. Эти твердые частицы, состоящие из солей, генетического материала вируса и высушенной слизи, называются капельными ядрами. В зависимости от содержания твердых частиц, капельные ядра значительно меньше, чем исходные капли, из которых они образовались. В главе 9 мы остановимся на этом более подробно. Благодаря своим небольшим размерам капельные ядра также могут перемещаться по воздуху во взвешенном состоянии. Поэтому даже при низкой влажности они образуют устойчивый аэрозоль, который может со временем накапливаться в помещении при условии наличия источников, и если он не будет отфильтрован или выведен.

Поскольку вероятность непрямого заражения в помещении возрастает с увеличением числа инфицированных людей и продолжительности их пребывания в помещении, необходимо принять меры для ограничения вирусной нагрузки в помещении. Какое предельное значение следует рассматривать в качестве ориентира, в настоящее время не установлено, как и неясно, каким образом следует измерять концентрацию SARS-CoV-2 в помещении. Во многих зданиях установлены вентиляционные системы, обеспечивающие контролируемое отведение загрязненного воздуха, а также приток отфильтрованного/свежего воздуха снаружи. В регионах с умеренными климатическими условиями вентиляция обычно осуществляется с помощью свободного проветривания посредством открытых окон и дверей. Рекомендуемый обменный расход воздуха основан на количестве выводимого CO₂ и других паров, выделяемых человеком (например, водяных паров), а также на накоплении в помещении вредных веществ (например, радона) и предотвращении повреждения зданий (например, вследствие образования плесени) [16]. Еще в 1858 году Макс фон Петтенкофер установил, что предельными значениями концентрации CO₂ в помещении следует считать 1000 см³/м³ [17]. Однако при загрязнении окружающей среды до значений CO₂ в 450 см³/м³ в городах этого значения часто очень трудно достичь [18]. Во многих сферах деятельности, независимо от концентрации CO₂, рекомендуется обеспечивать приток определенного количества свежего воздуха в час, которое зависит от назначения помещения. Чтобы избежать загрязнения помещений и обеспечить работоспособность находящихся в них людей, объем приточного воздуха в час для офисов, ресторанов и торговых залов должен составлять 4-8-кратный объем помещения [18, 19]. Однако если в помещение выбрасываются загрязняющие вещества, представляющие значительный риск для здоровья, как, например, вирусы, то в зависимости от уровня риска необходим значительно более высокие обменный расход воздуха — ок. 12-15-кратный объем помещения [20, 21, 22].].

Основное преимущество центральных систем кондиционирования перед свободным проветриванием заключается в том, что они непрерывно обеспечивают необходимое качество воздуха в помещении и не требуют регулярного ручного проветривания с помощью окон, см. рис. 1 (слева). Однако их следует регулярно обслуживать и надлежащим образом эксплуатировать. Зачастую, по причине оптимизации энергетических затрат, они эксплуатируются в режиме подачи небольшого количества приточного воздуха и оборудованы простыми фильтрами. Однако для предотвращения риска непрямого заражения необходима подача достаточного количества свежего воздуха или очень качественная фильтрация воздуха в помещении [23]. В Германии, в виду наличия соответствующих климатических условий приток свежего воздуха часто осуществляется с помощью свободного проветривания через открытые окна. В случае залпового проветривания, при соответствующих ветровых условиях или перепадах температур, существующая концентрация загрязняющих веществ в помещении может

быть значительно снижена в течение короткого периода времени, однако после закрытия окон концентрация загрязняющих веществ постепенно увеличивается, что схематически показано на рис. 1 (справа).

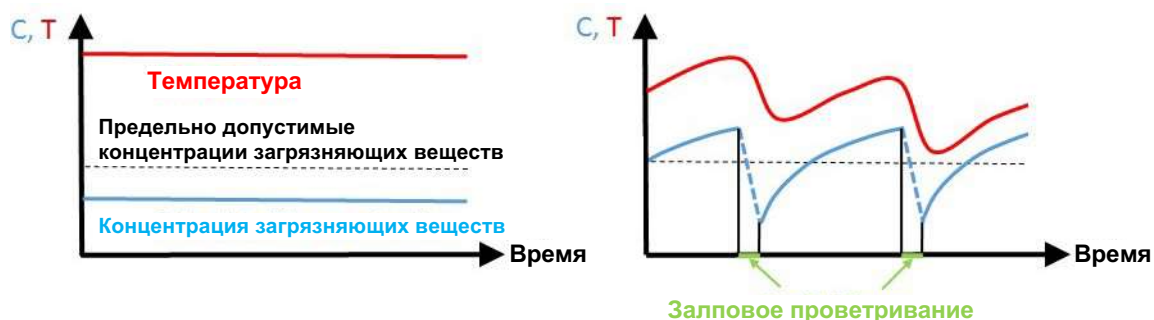


Рисунок 1: Схематическое представление концентрации загрязняющих веществ и температурного градиента в помещении с центральной системой кондиционирования (слева) и при залповом проветривании (справа)

Поэтому для поддержания концентрации загрязняющих веществ на низком уровне часто необходимо залповое, или постоянное проветривание. Сквозное проветривание наиболее эффективно при подходящих погодных условиях, но может быстро вызвать дискомфорт. С другой стороны, открытое в наклонном положении окно, как правило, не обеспечивает необходимую циркуляцию воздуха в помещении [16]. В этих условиях рекомендуется открыть два окна, перед одним окном ставить вентилятор, который будет обеспечивать приток свежего воздуха в помещение снаружи. Вследствие повышения давления использованный или загрязненный воздух выводится наружу через другое окно. С помощью этого метода все помещения снабжаются свежим воздухом, что позволяет сократить время нахождения аэрозоля в помещении, поэтому риск непрямого заражения становится крайне маловероятным. Однако в холодное время года свободное проветривание не только неудобно, но и может быть вредным для здоровья. Кроме того, свободное проветривание нерационально с энергетической точки зрения и невозможно в помещениях без окон. Эффективность воздухообмена при свободном проветривании зависит от таких неуправляемых параметров, как положение и размер окон, скорость и направление ветра снаружи окон, разница температур внутри и снаружи, желание людей производить свободное проветривание. [24, 25].

Трудно определить, какой тип вентиляции обеспечивает наилучшую защиту от непрямого заражения SARS-COV-2, так как количество выбрасываемых вирусных частиц, концентрация вируса, а, следовательно, и вероятность заражения в помещении неизвестны. Поскольку между концентрацией вируса и другими переменными, такими как концентрация CO_2 , нет никакой предполагаемой взаимозависимости, то косвенное измерение вирусной нагрузки по содержанию CO_2 не представляется возможным. По этой причине следует стремиться к максимальному возможному объемному расходу воздуха с тем, чтобы свести к минимуму вероятность заражения. Ввиду того, что заражение SARS-COV-2 может представлять смертельную опасность, безусловно, разумным будет не снижать, а превысить рекомендованный объемный расход воздуха.

Следует отметить, что в условиях нынешней пандемии дополнительные проблемы, связанные с минимизацией риска заражения в закрытых помещениях, возникнут не позднее зимы. Обсуждаемое в настоящее время открытие школ без соблюдения

социальной дистанции и без использования масок или респираторов для фильтрации вирусных частиц вызывает у многих озабоченность, поскольку существует вероятность того, что произойдет перекрестное заражение детей вирусом, который затем по цепочке будет передан родителям, а также дедушкам и бабушкам. Поскольку показатель смертности возрастает в зависимости от возраста, эта обеспокоенность многих родителей является вполне логичной и обоснованной. Поэтому встает вопрос о том, можно ли эффективно свести к минимуму вирусную нагрузку в зданиях, не оборудованных центральными системами кондиционирования с фильтрами H13/H14 или где невозможен 100% приток свежего воздуха без снижения комфорта и нанесения вреда здоровью.

Необходимо искать решение, которое не вызывает резкого перемещения воздушных масс в помещении или больших колебаний температуры/влажности, приводящих к уменьшению комфорта [26], и не способствующее неконтрольному распределению аэрозольных частиц, загрязненных вирусным материалом (капли и капельные ядра), выступая в качестве «рассадника вирусов» [4]. Для этого важно обеспечить достаточный воздухообмен, а время нахождения выбрасываемых аэрозольных частиц в воздухе помещения должно быть сведено к минимуму. Показатель воздухообмена не означает, что воздух в помещении полностью заменяется, как в воздушном насосе, но представляет собой долю подаваемого свежего или очищенного воздуха по отношению к объему помещения в час [24]. С другой стороны, скорость перемещения воздушных масс и турбулентные колебания воздуха не должны быть слишком большими, иначе это может отрицательно повлиять на комфорт людей, находящихся в помещении, в зависимости от их одежды и рода деятельности. На рис. 2 показана зависимость комфорта от средней скорости воздушного потока, турбулентных колебаний воздуха и температуры [26]. Области ниже соответствующей кривой градиента можно считать «комфортными». В качестве ориентира: при умеренных температурах в помещении скорость воздуха в течение длительного периода времени должна, в среднем, составлять меньше 0,3 м/с.

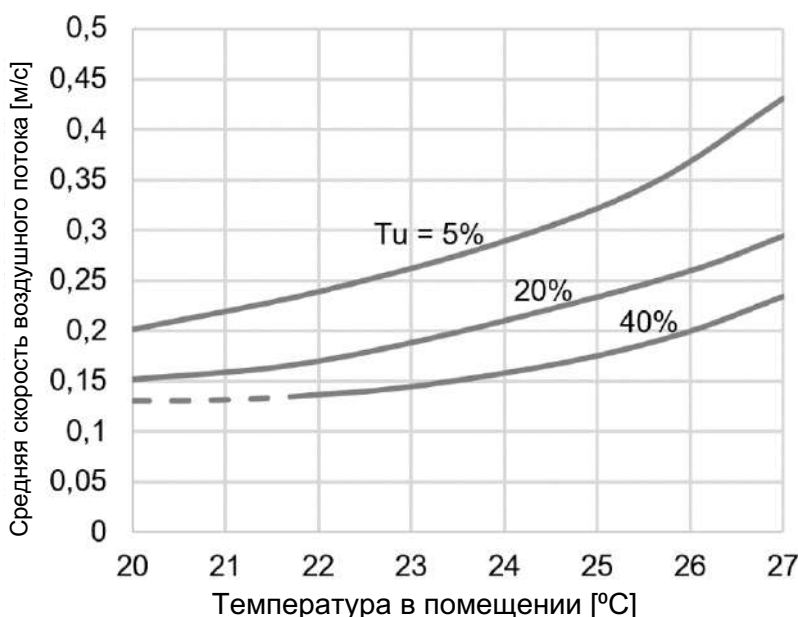


Рис. 2: Зоны с комфортной скоростью воздушного потока, в соответствии с [26]

Очень важно учитывать движение воздушных потоков в помещении, т.к. на них могут оказывать влияние стационарные объекты (лампы), или другие крупные объекты в помещении, а также отверстия в стенах (сквозняк) и перемещение людей (смешивание

потоков, термическая конвекция) [24, 25]. Поэтому для эффективной фильтрации аэрозоля в помещении с помощью мобильных устройств важно правильное размещение очистителя воздуха. Значительную роль также играет положение, при котором аэрозольные частицы выбрасываются локально. Другие важные параметры включают в себя концентрацию выбрасываемого аэрозоля в зависимости от рода активности и времени нахождения людей в помещении.

В связи со сложностью задачи расчета воздушного потока, в контексте этих исследований используется экспериментальный подход, поскольку только таким образом многие влияющие факторы могут быть правильно измерены физически.

В экспериментальных исследованиях использовался очиститель воздуха для помещений TROTEC TAC V+ со следующими характеристиками [27]:

1. Максимальный расход воздуха около 1500 м³/ч.
2. Фильтр класса F7 и H14. H14 означает, что аэрозольные частицы диаметром от 0,1 до 0,3 мкм будут отфильтрованы на 99,995%. Более крупные частицы будут отфильтрованы на 100%.
3. После каждого использования фильтр нагревается примерно до 100°C , уничтожая вирусы на фильтре и предотвращая образование биопленок, скопление бактерий и грибков без использования вредных химических добавок или УФ-излучения.
4. Несмотря на вес, устройство можно легко перемещать, так что его можно использовать в различных помещениях без каких-либо проблем.

2. Опытная модель и проведение анемометрии по изображениям частиц (PIV)

Цель первой серии экспериментов заключалась в количественном определении характеристик всасывания и выпуска воздуха очистителем на различных мощностях/при различных объемных расходах. Согласно рис. 2 также необходимо измерить среднюю скорость воздушных потоков и оценить количество турбулентных воздушных потоков в зоне размещения очистителя воздуха. Эти параметры необходимы для определения того, создает ли движение воздуха дискомфорт для людей, находящихся рядом с очистителем. Скорость воздушного потока в диапазоне менее 0,3 м/с обычно не воспринимается как некомфортное даже во время спокойной деятельности. Поскольку воспринимаемое людьми движение воздуха состоит из суммы средних и турбулентных потоков, сумма обеих частей должна быть в среднем менее 0,3 м/с. Для определения этих двух величин в зависимости от расстояния до устройства был использован метод анемометрии по изображениям частиц (PIV) [28]. В этой методике измерения движение искусственно генерируемых аэрозольных частиц, которые следуют точно за движением воздуха, фиксируется цифровыми камерами лазерной световой секции в два момента времени, а затем при помощи цифровой обработки изображений определяется смещение изображений частиц. Принимая во внимание временной интервал между измерениями и калибровкой, на основе смещения изображений частиц можно бесконтактно определить распределение скоростей в пространственном разрешении в плоскости измерения. На рис. 3 показаны снимки экспериментальной конструкции и снимки во время измерения.

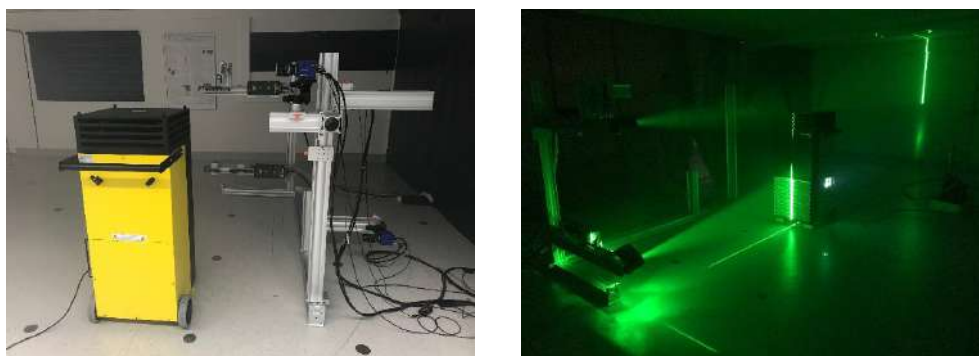


Рисунок 3: Экспериментальная конструкция с очистителем воздуха, двумя сдвоенными импульсными лазерами и четырьмя sCMOS-камерами (слева); фото измерений с помощью PIV (справа)

Во время экспериментов использовались 4 камеры PCO.Edge 5.5 sCMOS с макрообъективами Zeiss с фокусным расстоянием 35 мм и 50 мм. Аэрозоль был создан с помощью посевного генератора компании PIVTEC из ди-2-этилгексил-себаката (DEHS). Средний диаметр аэрозольных частиц составляет 1 мкм, а распределение по размерам составляет от 0,1 до 2 мкм [29]. Для проведения экспериментов с помощью анемометрии по изображениям частиц, описанных в главе 6, использовались заполненные гелием мыльные пузыри со средним диаметром около 350 мкм, созданные с помощью генератора HFSB от LaVision. Для освещения частиц использовались два лазера Quantel Evergreen 200, лучи которого были растянуты в световые секции с помощью различных линз [28]. Управление измерительной системой осуществлялось с помощью программного обеспечения DaVis от LaVision GmbH, которое также использовалось для оценки данных.

3. Характеристики поля потока в пространстве рядом с очистителем воздуха.

На рисунках 4-9 показаны результаты измерений при объемном расходе 600 м³/ч, 1000 м³/ч и 1500 м³/ч. На верхнем рисунке скорость потока обозначена цветом, направление средней скорости потока — векторами; на нижнем рисунке указана величина турбулентного потока.

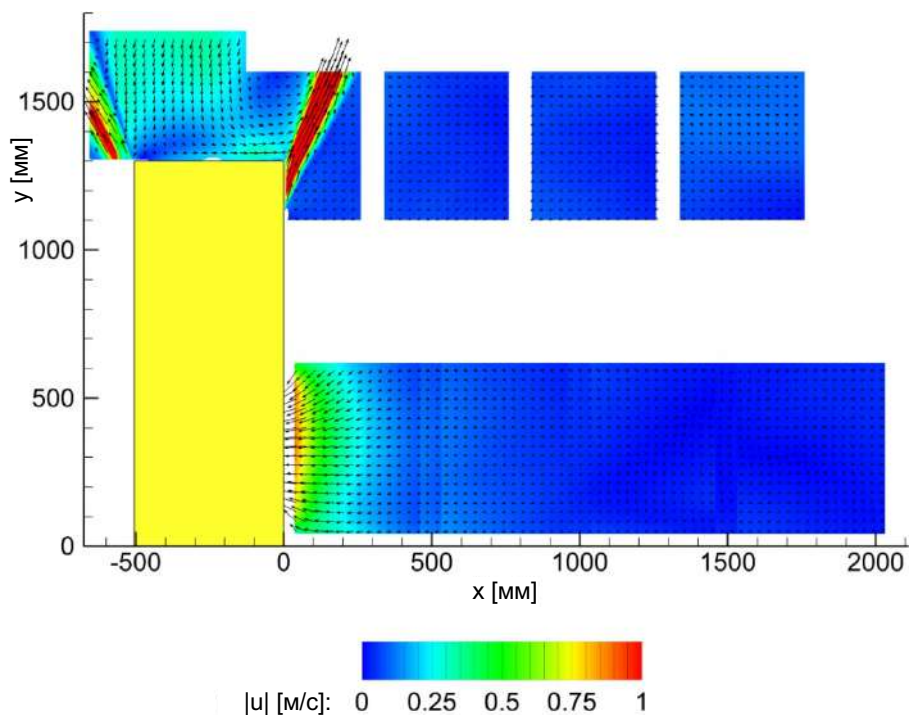


Рис. 4: Среднее поле скоростей потока, измеренное на скорости 600 м³/ч.

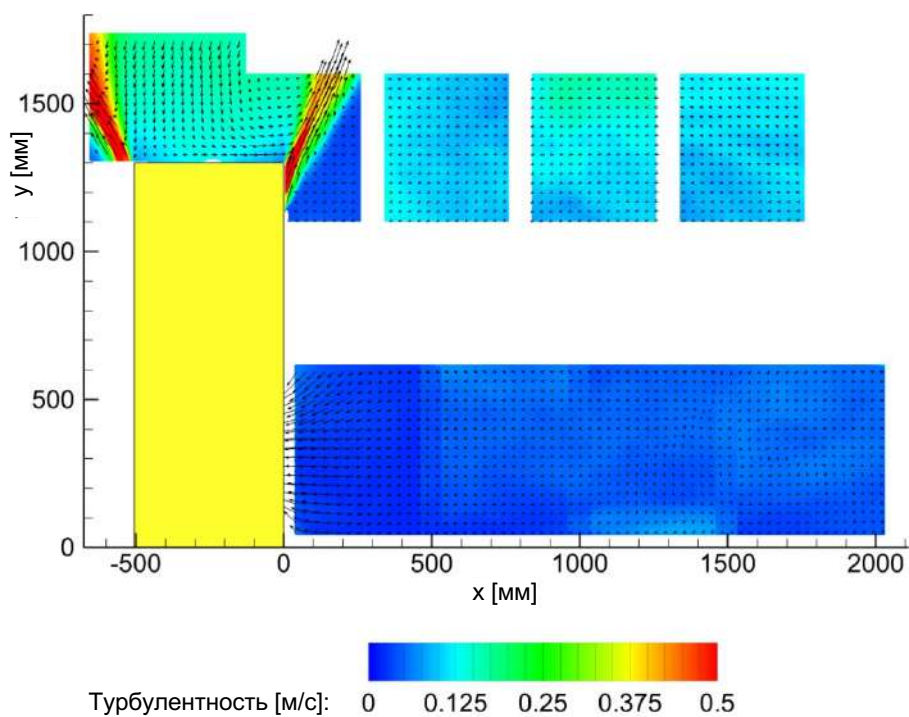


Рис. 5: Движение турбулентного потока, усредненное по времени при 600 м³/час.

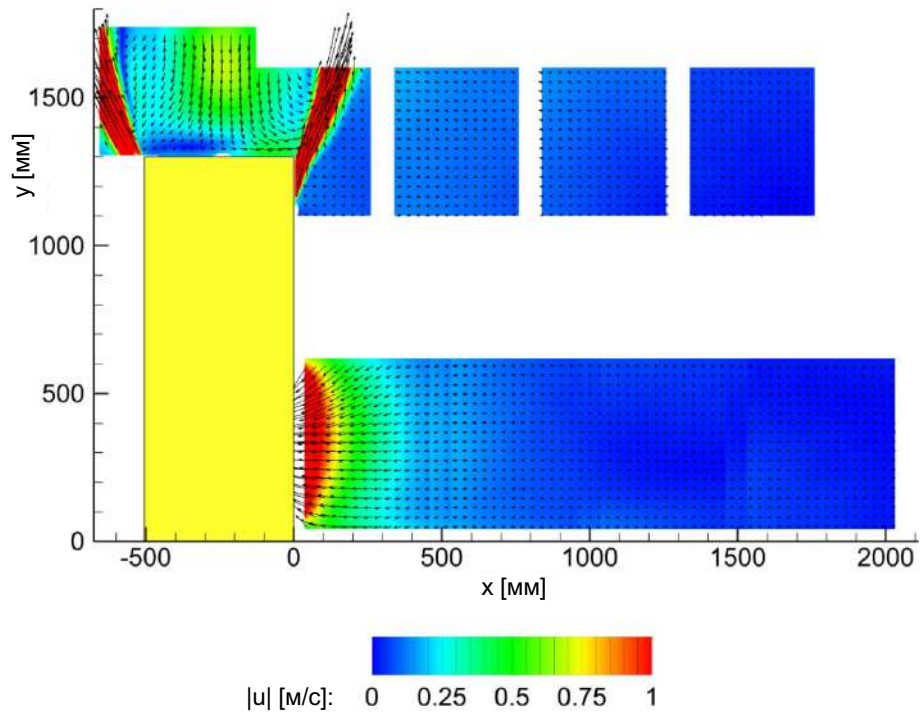


Рис. 6: Среднее поле скоростей потока, измеренное на скорости $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

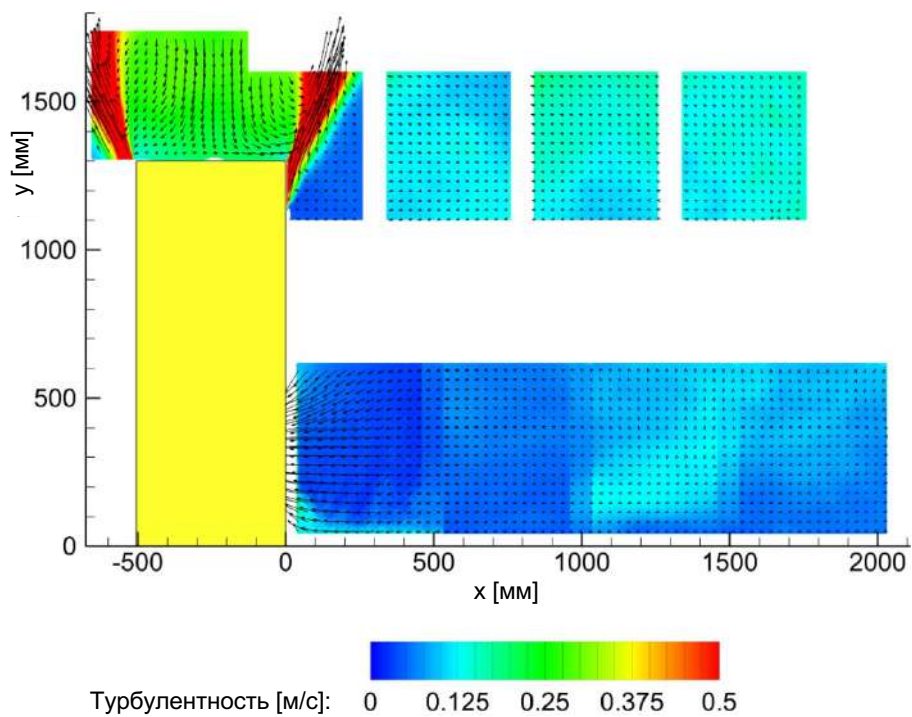


Рис. 7: Движение турбулентного потока, усредненное по времени при $1000 \text{ м}^3/\text{час}$.

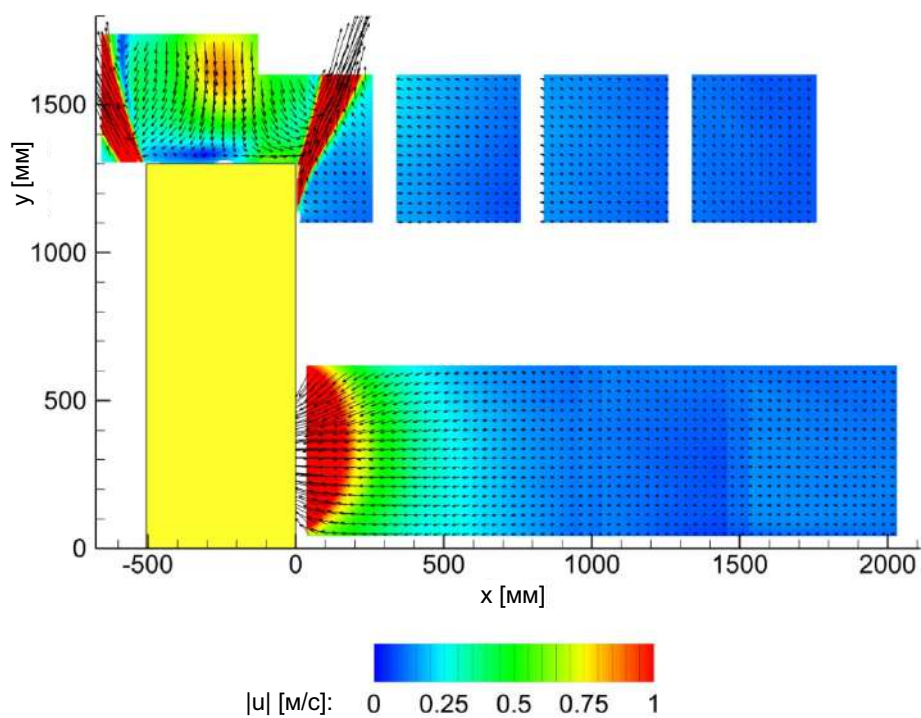


Рисунок 8: Среднее поле скоростей потока, измеренное на скорости 1500 м³/ч.

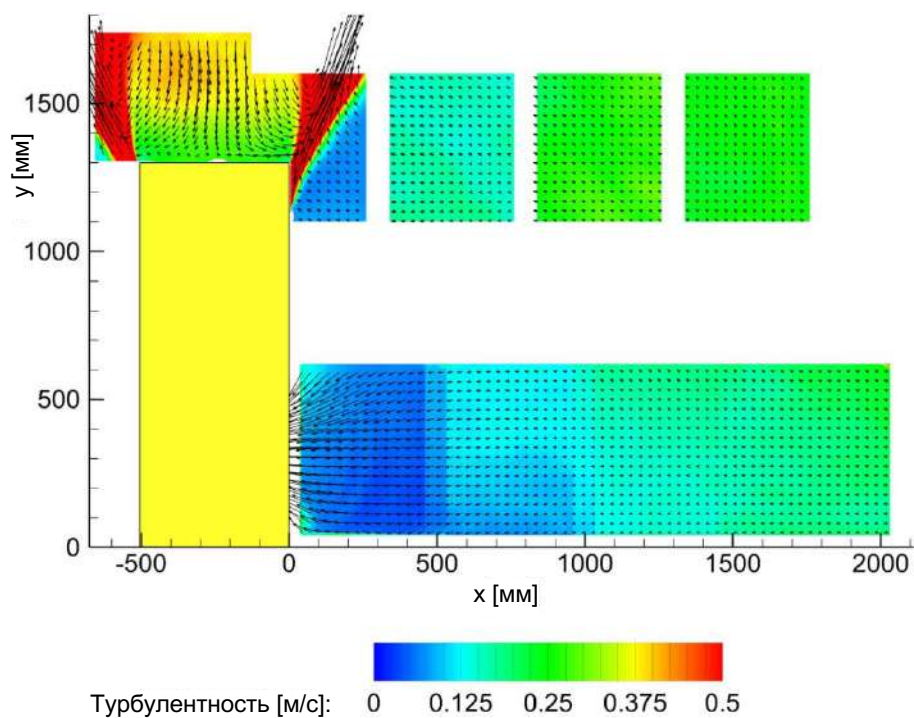


Рисунок 9: Движение турбулентного потока, усредненное по времени при 1500 м³/час.

Результаты количественных измерений показывают, что средняя скорость потока и турбулентное движение в пространстве рядом с очистителем не превышают критических значений, приведенных на рис. 2. Таким образом, даже в непосредственной близости к очистителю воздуха в помещении, дискомфорт от

движения воздушных масс ощущаться не будет. При объемном расходе в 1500 м³/ч скорость потока в зоне всасывания воздуха несколько больше, но только на уровне ног и на расстоянии прикл. 0,5 м до устройства. В чувствительных областях головы и тела средние скорости потока и турбулентное движение воздуха значительно меньше 0,3 м/с. Значительно более высокие скорости потока достигаются непосредственно в зоне оттока и над верхней частью устройства. Однако на расстоянии 0,5 м от устройства они не ощущаются человеком даже при стоянии во весь рост, поскольку свободная выходящая струя воздуха в значительной степени отводится вверх с помощью дефлекторов. Таким образом, почти невозможна блокировка выходящей струи воздуха, которая могла бы привести к снижению эффективности фильтрации воздуха в помещении. На основании указанных данных можно сделать вывод, что скорость воздушных потоков при работе очистителя воздуха соответствует нормативам.

4. Влияние объектов на воздушный поток в помещении

Независимое исследование показало, что эффективность фильтрации может зависеть от размещения устройства и расположения объектов в помещении [30]. Чтобы определить, в какой степени расположение очистителя воздуха вблизи стены и длинных потолочных светильников может негативно повлиять на движение воздушных потоков и, таким образом, увеличить время, необходимое для фильтрации воздуха в помещении, очиститель воздуха был расположен рядом со стеной, а выходная струя была заблокирована потолочными светильниками, разделяющими пространство комнаты. Распределение скорости, приведенное на рис. 10, показывает, что выходящий из очистителя воздух сначала поднимается вверх, а затем отклоняется по потолку. Благодаря эффекту Коанда, выходящий воздух распространяется по потолку как т. н. пристеночная струя. За счет выступающих потолочных светильников, которые проходят по всей длине помещения, возникает изгиб потока и, следовательно, образуется сильное завихрение. Такие вихревые потоки, как правило, оказывают негативное влияние на качество фильтрации, так как отфильтрованный воздух частично возвращается в устройство и снова фильтруется до того, как достаточное поглощение вирусов в помещении может быть достигнуто путем захвата [24]. Поэтому следует избегать такой расстановки настолько, насколько это возможно, размещая устройство в помещении надлежащим образом.

Для эффективной фильтрации воздуха в помещении рекомендуется располагать очиститель воздуха как можно дальше от стен, ориентируясь на середину самой длинной стороны помещения, чтобы воздушные струи, попадающие на потолок, могли как можно дольше протекать вдоль него. Если потолок гладкий, а размер помещения не слишком большой, то возможно течение воздушного потока к другой боковой стене. Затем поток отклоняется вниз и протекает вдоль пола обратно в зону всасывания очистителя воздуха, как схематически показано на рис. 11 (слева). Это обеспечивает наилучший воздухообмен, так как загрязненные воздушные потоки непрерывно переносятся в помещении к устройству, образуя лишь несколько крупных завихрений. Если на пути распространяющегося по потолку воздушного потока будут препятствия, например основание светильника, то движение потока будет выглядеть как показано на рис. 11 (справа), при условии, что пространство комнаты достаточно велико.

Источники тепла (отопление, плита, группа людей) в помещении также могут являться препятствиями для распространения воздуха по потолку. Источники тепла приводят к снижению плотности воздуха: вследствие пониженной плотности воздушный поток

становится легче окружающего воздуха и выдавливается более тяжелыми воздушными массами вниз. Затем этот конвективный поток поднимается к потолку, где отклоняется одновременно во всех направлениях. Таким образом, этот восходящий поток может противодействовать движению потока, генерируемому очистителем, и может приводить к отделению потока от поверхности потолка.

В этом случае также возможно формирование вихревого потока, который не охватывает всё пространство помещения, снижая тем самым производительность очистителя, как показано на схеме на рис. 11 (справа). Вместе с тем следует отметить, что при турбулентном движении воздуха в помещении весь воздух неминуемо попадет в зону очистителя через определенный промежуток времени, и аэрозольные частицы будут отфильтрованы. Тем не менее, цель должна заключаться в том, чтобы максимально возможно сократить время фильтрации воздуха в помещении.

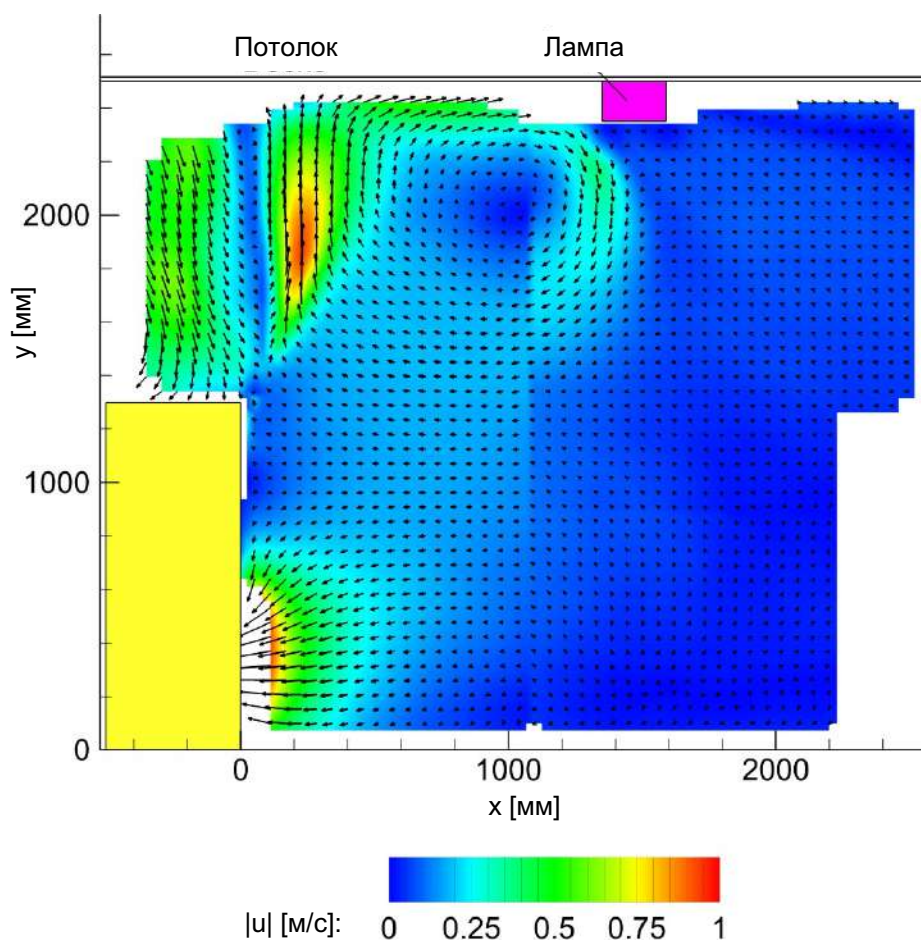


Рис.10: Измеренный поток воздуха перед устройством, в помещении с прерывающимся потолком

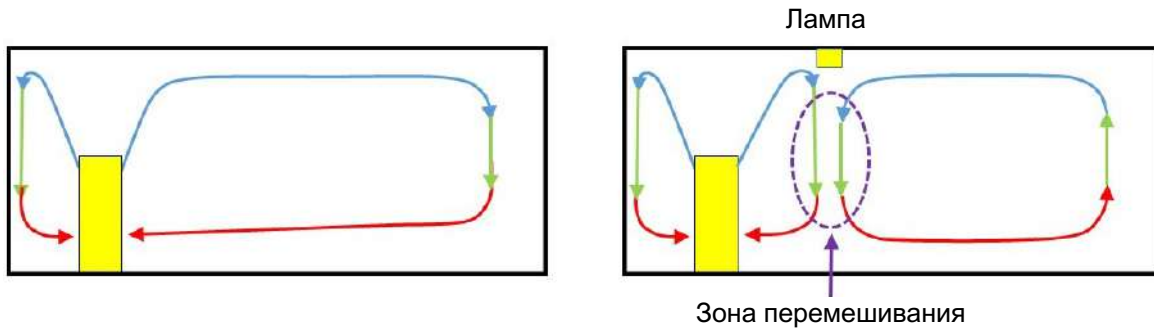


Рисунок 11: Упрощенное схематическое изображение воздушного потока в пустом помещении (слева) и при наличии светильников на потолке (справа). В реальности, такие явления в потоке происходят в трех измерениях.

5. Опытная модель и проведение измерений концентрации

С целью количественного определения фильтрующей способности очистителя воздуха были проведены измерения концентрации одновременно на шести позициях в помещении площадью 80 м². Для определения скорости снижения концентрации аэрозоля в помещении использовался метод визуализации частиц. С этой целью помещение однородно заполняется очень стойкими аэрозольными частицами в высокой концентрации, распределение которых по размерам соответствует аэрозольным частицам, производимым человеком во время дыхания, разговора и пения. Устойчивость аэрозоля очень важна, иначе, в результате испарения, результаты измерений могут быть искажены. Кроме того, важен небольшой размер частиц. В противном случае, частицы аэрозоля будут оседать с течением времени, что также приведет к систематическим ошибкам измерения. Аэрозоль освещается импульсным лазером, фиксируется с помощью камеры с подходящим объективом и сохраняется для дальнейшей обработки. Количество изображений частиц на датчике соответствует количеству аэрозольных частиц в освещенном объеме. Количество изображений частиц на датчике не должно быть слишком высоким, так как перекрывающиеся изображения частиц систематически искажают подсчет. По этой причине масштаб изображения оптической системы должен быть подобран под начальную концентрацию аэрозоля. Для обнаружения изображений частиц применяются цифровые фильтры, которые подавляют шум, а затем, с помощью порогового значения интенсивности, производится удаление фона. В результате такой предварительной обработки на изображении остаются только частицы, подлежащие подсчету. Без такой предварительной обработки изображения стохастический шум изображения может быть ошибочно интерпретирован как сигнал, что приведет к систематическим ошибкам измерения. Съемка с фиксированной частотой в течение достаточно длительного периода времени позволяет надежно подсчитать отдельные изображения частиц на каждом отдельном снимке. В результате измерений получается число измеренного объема с течением времени, на основании которого можно определить такие параметры как скорость снижения концентрации, период полураспада вируса и т.д.

С целью анализа эффективности очистителя воздуха TROTEC TAC V+, в помещении площадью 80 кв. м. производилось измерение концентрации аэрозоля одновременно в 6 отдельных точках в помещении. Для соблюдения правила симметрии, концентрация определялась только на оси симметрии пространства и в одной половине помещения. С помощью посевного генератора PIVTEC, из ди-2-этилгексил-себаката (DEHS) был образован аэрозоль с распределением частиц по размерам от 0,1 до 2 мкм и средним диаметром около 1 мкм [19]. Использовались 6 камер PCO.Edge 5.5 sCMOS с макрообъективами Zeiss с фокусным расстоянием 50 мм. Для освещения аэрозоля в измерительном объеме использовались 2 лазера Quantel Evergreen 200, причем лазеры были установлены таким образом, чтобы на каждую из 3 точек измерения (камер) приходился один лазерный луч для освещения локального объема измерения (MP1 – MP3 и MP4 – MP6). Отдельные камеры и лазеры управлялись централизованно с помощью программного обеспечения DAVIS от LaVision, так что снимки со всех 6 камер были произведены синхронно. Частота записи составляла 1 Гц.

На рис. 12 показано оптически искаженное панорамное изображение экспериментального расположения в помещении, а на рис. 13 — геометрия и размеры помещения, а также положение устройства и шесть точек измерения на виде в плане.

Были выбраны два положения устройства. Положение А может рассматриваться как квазиоптимальное. Расположение в центре помещения представляется еще более выгодным с точки зрения эффективности фильтрации, как показано на рисунке 11, но практическая реализация такого центрального расположения возможна лишь в самых редких случаях. Положение Б представляет собой наиболее невыгодное положение в пространстве, так как размещение устройства в углу комнаты и наличие светильников на потолке помешает оптимальному распределению потока воздуха, как показано на рис. 10.



Рис. 12: Оптически искаженное панорамное изображение помещения для испытаний с компонентами для измерения концентрации

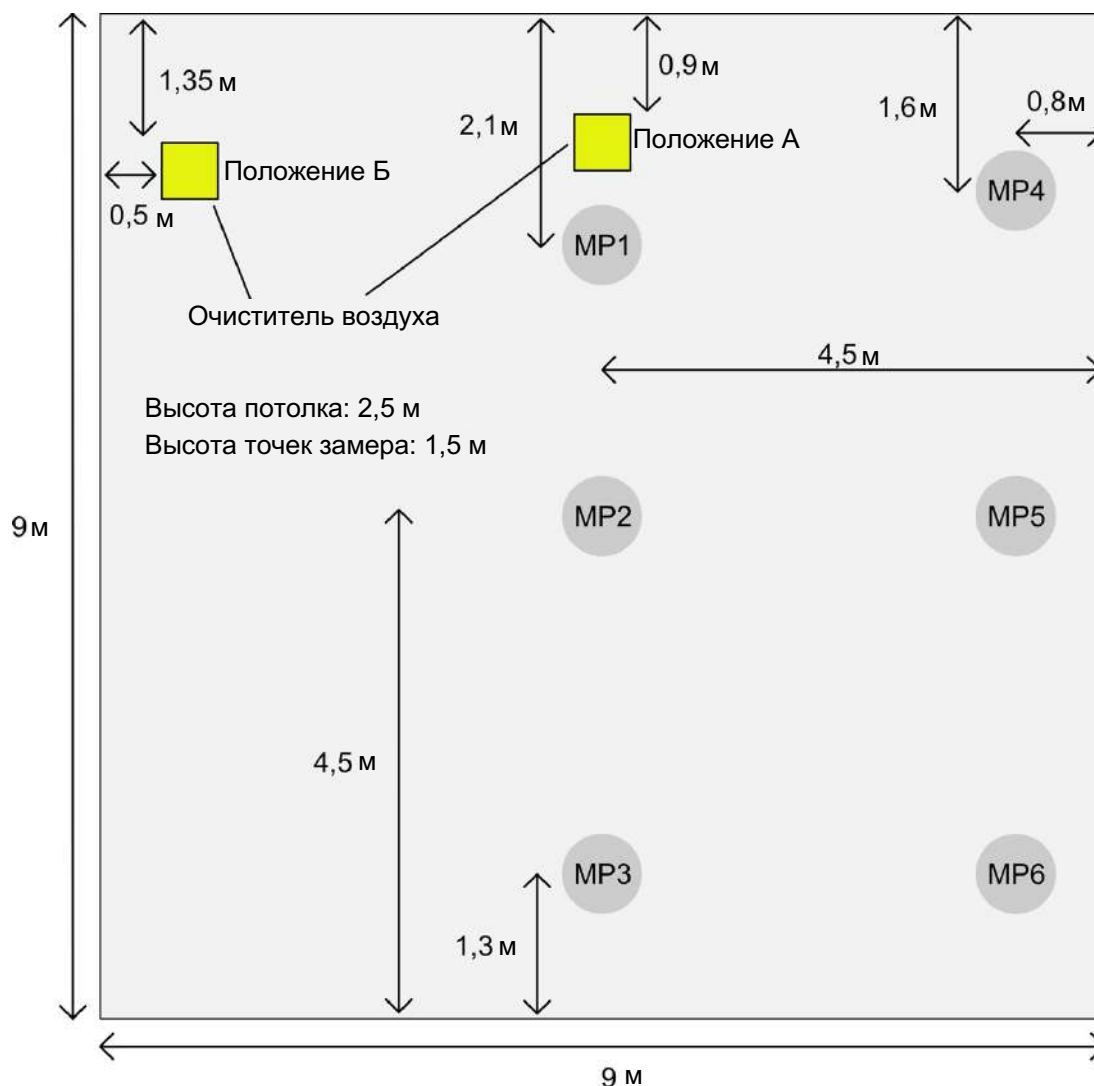


Рис. 13: Расположение компонентов для измерения концентрации в пространстве

6. Результаты измерения концентрации

С помощью экспериментальной установки, используемой в разделе 2, сначала визуально проверялась степень фильтрации воздушного потока на выходе из устройства. Для этого во всем помещении был равномерно распылен аэрозоль DEHS с диаметром частиц 0,1 – 2 мкм (средний диаметр около 1 мкм) [19]. С помощью лазерной световой секции в зоне воздушного потока можно было установить, выходит ли аэрозоль из выпускной зоны устройства. На рисунке 14 показано, что свободная струя, выходящая из верхнего угла очистителя воздуха, не содержит аэрозоля при различном объемном расходе (черные области). И наоборот — зона вокруг свободной струи полностью загрязнена аэрозолем (белые области). Таким образом, производительность фильтра класса H14 наглядно видна даже при больших объемных расходах. Хорошие результаты показывает и турбулентная структура свободной струи и подсос, т.е. смешивание воздуха с аэрозольных участков с чистой свободной струей [24]. Такой эффект подсоса (или смешивания) очень важен для эффективного перемещения аэрозоля в зону всасывания очистителя воздуха.



Рис. 14: Распределение аэрозоля в зоне воздушного потока при объемном расходе $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$

На рис. 15 показан пример динамики концентрации аэрозоля с течением времени. На рисунке слева в качестве ориентира показана концентрация аэрозоля при выключенном очистителе воздуха. Поскольку все отверстия в помещении были плотно заклеены, а аэрозольные частицы почти не оседают, то концентрация остается постоянной в течение всего времени измерения. Таким образом, естественная скорость осаждения не влияет на измерения концентрации аэрозоля при включенном устройстве. Кроме того, испытания проводились на работающем устройстве без фильтров F7 и H14. То, что падение концентрации частиц немного сильнее, чем в случае с выключенным очистителем воздуха, связано с тем, что некоторые аэрозольные частицы могут оседать в вентиляторном агрегате из-за воздействия центробежных сил. Однако жидкостной пленки не удалось обнаружить ни на вентиляторе, ни в корпусе вентиляторного агрегата.

Полученные результаты наглядно демонстрируют, что небольшие устойчивые капельные ядра остаются в воздухе практически постоянно в условиях, когда скорость испарения равна скорости конденсации. Указанные значения времени спада на рисунке 15 (слева) позволяют оценить, сколько времени требуется для достижения желаемой концентрации аэрозоля вследствие явлений осаждения на стенах. Очень маленькая постоянная спада концентрации явно показывает, что аэрозоль может представлять опасность инфицирования в течение многих часов, если только он не будет отфильтрован, или если деактивация вирусов с течением времени не сделает инфицирование маловероятным.

Также очевидно, что, поскольку аэрозоль не испаряется полностью, он может переноситься с воздушным потоком на очень большие расстояния (многие километры). Однако следует учитывать, что при таком переносе концентрация и, следовательно, вероятность заражения значительно снижаются благодаря двум явлениям. Во-первых, турбулентная диффузия обеспечивает пространственное распространение аэрозоля, которое происходит даже тогда, когда средняя скорость потока равна нулю. А во-вторых, аэрозоль, выделяемый в течение периода времени, сильно «растягивается» в пространстве и, следовательно, разбавляется, когда средняя скорость потока не равна нулю. Например, если человек при легкой физической нагрузке выдыхает в течение 2 секунд 1 литр воздуха, а окружающий воздух имеет скорость 1 м/с, тогда выдыхаемый воздух распространится в пространстве на расстояние 2 м вследствие движения потока. Таким образом, расчетная концентрация аэрозоля и, следовательно, вирусная нагрузка воздушного шлейфа от человека, выдыхающего аэрозоль, уменьшится в 20 раз. Например, если частицы вируса будут выдыхаться велосипедистом, едущим со скоростью 10 м/с, то вирусная нагрузка воздушного шлейфа уменьшится в 200 раз только благодаря скорости движения велосипедиста. Если, к тому же, принимать во внимание турбулентную диффузию, то концентрация снова уменьшится не менее чем на 1 – 2 порядка. Кроме того, не обязательно все аэрозольные частицы содержат в себе вирусы, см. главу 8. На открытом воздухе, при достаточной скорости движения воздушных масс, риск непрямого заражения через аэрозоль крайне маловероятен.

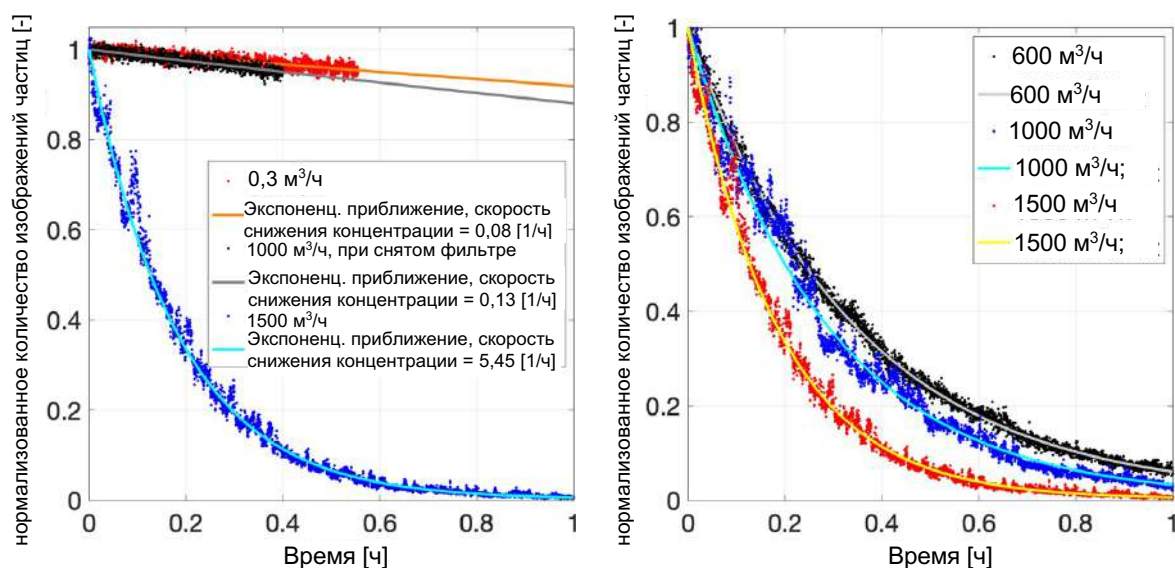


Рис. 15: Снижение концентрации аэрозоля с течением времени для различных значений объемного расхода и связанных с ними функций экспоненциального приближения

На рисунке 15 (справа) показано снижение концентрации аэрозоля в помещении площадью 80 м² в зависимости от времени и объемного расхода очистителя воздуха. Очень эффективное снижение концентрации в течение нескольких минут показывает хорошую производительность комбинации фильтров F7 / H14 в сочетании с эффективным объемным расходом очистителя воздуха. Экспоненциально уменьшающаяся концентрация аэрозоля позволяет количественно определить характерные величины, которые очень важны для оценки производительности фильтра. Постоянная спада концентрации является здесь показателем эффективности фильтрации. Чем выше значение, тем лучше эффект фильтрации и тем короче время, необходимое для фильтрации воздуха в помещении. Скорость уменьшения концентрации вдвое показывает, сколько времени должно пройти до того момента,

когда концентрация аэрозоля в месте измерения уменьшится наполовину. Среднее время пребывания показывает, насколько долго статистически задерживаются в помещении аэрозоли, производимые в соответствующих местах замеров, до тех пор, пока они не будут отфильтрованы (осаждены) очистителем воздуха.

Таблица 1: Снижение концентрации аэрозоля с течением времени для различных значений объемного расхода.

Скорость снижения концентрации (черный), время снижения концентрации вдвое (зеленый) и среднее время пребывания аэрозоли в помещении (голубой).

Точка замера	600 м ³ /ч (Положение А)	1000 м ³ /ч (Положение А)	1500 м ³ /ч (положение А)	1000 м ³ /ч (Положение Б)
Точка замера 1	3,30 0,21 0,30	4,13 0,17 0,24	6,06 0,11 0,17	3,35 0,21 0,30
Точка замера 2	3,04 0,23 0,33	3,86 0,18 0,26	5,95 0,12 0,17	3,04 0,23 0,33
Точка замера 3	2,90 0,24 0,34	3,48 0,20 0,29	5,48 0,13 0,18	3,22 0,22 0,33
Точка замера 4	3,11 0,22 0,32	4,03 0,17 0,25	6,16 0,11 0,16	3,47 0,20 0,29
Точка замера 5	3,05 0,23 0,33	3,82 0,18 0,26	6,05 0,11 0,17	3,25 0,21 0,31
Точка замера 6	2,86 0,24 0,35	3,65 0,19 0,27	5,62 0,12 0,18	2,95 0,24 0,34
Скорость снижения концентрации [1/ч] время снижения концентрации вдвое [ч] среднее время пребывания [ч]				

Производительность фильтра сильно зависит от объёмного расхода очистителя воздуха в помещении, но, несмотря на размер помещения, мало зависит от расстояния до устройства. При скорости 600 м³/ч концентрация аэрозоля в точке замера 1 снижается вдвое примерно через 12 минут, а в самой дальней точке замера, т.е. 6 — примерно через 14 минут. При объемном расходе 1500 м³/ч снижение концентрации аэрозоля вдвое в точке замера 1 занимает около 6 минут, и около 7 минут — в точке замера 6.

В правой колонке для сравнения приведены значения объемного расхода 1000 м³/ч для положения Б. По сравнению с результатами в положении А, происходит снижение производительности фильтра примерно на 20% при одинаковом объемном расходе. Таким образом, невыгодное расположение устройства в помещении может быть скомпенсировано высоким объемным расходом, но тогда при одинаковой производительности фильтра энергозатраты возрастут, а фоновый шум усилится. Поэтому выбор правильного положения очистителя является довольно важным фактором.

В таблице 2 приводится сравнение загрязненного и нового фильтра класса Н14. Принимая во внимание погрешность измерения $2\sigma=0,14$ [1/ч], существенной разницы между обоими фильтрами не обнаружено. Поэтому можно ожидать, что срок службы фильтров может составлять до нескольких лет в зависимости от нагрузки.

Таблица 2: сравнение загрязненного и незагрязненного фильтра

Точка замера	1000 м ³ /ч (Положение А), загрязненный фильтр	1000 м ³ /ч (Положение А), новый фильтр
Точка замера 1	4,13 0,17 0,24	4,22 0,16 0,24
Точка замера 2	3,86 0,18 0,26	3,75 0,18 0,27
Точка замера 3	3,48 0,20 0,29	3,50 0,20 0,29
Точка замера 4	4,03 0,17 0,25	4,09 0,17 0,24
Точка замера 5	3,82 0,18 0,26	3,82 0,18 0,26
Точка замера 6	3,65 0,19 0,27	3,60 0,19 0,28
Скорость снижения концентрации [1/ч] время снижения концентрации вдвое [ч] среднее время пребывания [ч]		

7. Зависимость производительности фильтра от геометрии помещения

Производительность фильтра зависит не только от устройства и места его установки, но и от геометрии пространства. В частности, в вытянутых помещениях фильтрация происходит хуже, так как идущий по потолку воздушный поток в какой-то момент отсоединяется, образуя область рециркуляции, вследствие чего поток не доходит до противоположной стены. Такая ситуация сопоставима с ситуацией, изображенной на рис. 11 (справа), где отделение потока от потолка обусловлено не объектом, а уменьшением импульса пристеночной струи с увеличением расстояния. Уменьшение импульса вызвано трением стены, турбулентным движением воздуха и подсосом, наглядно представленным на рис. 14. Именно вследствие подсоса медленные участки потока аэрозоля ускоряются отфильтрованной пристеночной струей, и работа, необходимая для этого, приводит к уменьшению импульса пристеночной струи. Турбулентность приводит, в первую очередь, к расширению потока, что также приводит к локальному уменьшению импульса и, следовательно, смещает положение отслаивания пристеночной струи ближе к устройству. Вследствие этих эффектов возможна ситуация, когда воздух в передней части комнаты будет очень хорошо отфильтрован, в отличие от задней области. Для исследования этой ситуации измерения проводились в удлиненном помещении, площадь поперечного сечения которого составляет около 4 м^2 . Были изучены два помещения различной длины: 22,4 м (экспериментальная конструкция см. рисунок 16) и 11,8 м (рисунок 17).

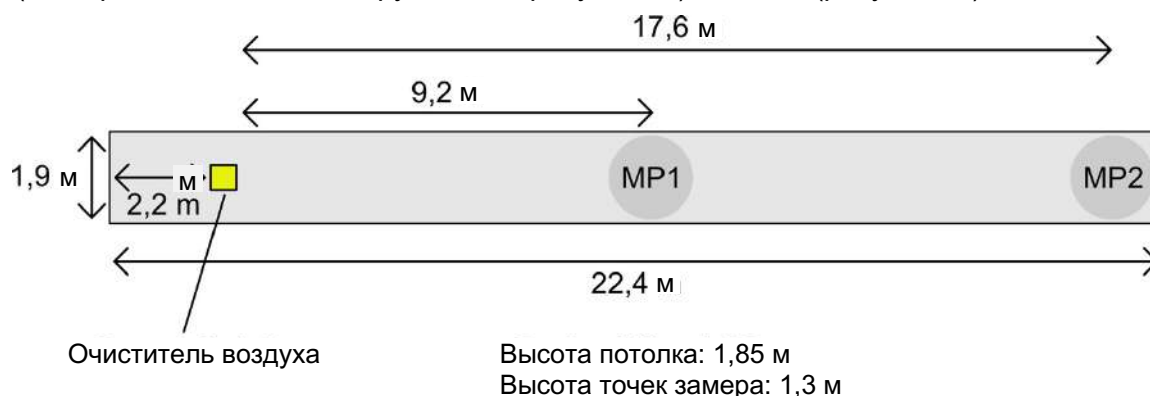


Рис. 16: Расположение компонентов в длинном коридоре для измерений концентрации аэрозоля

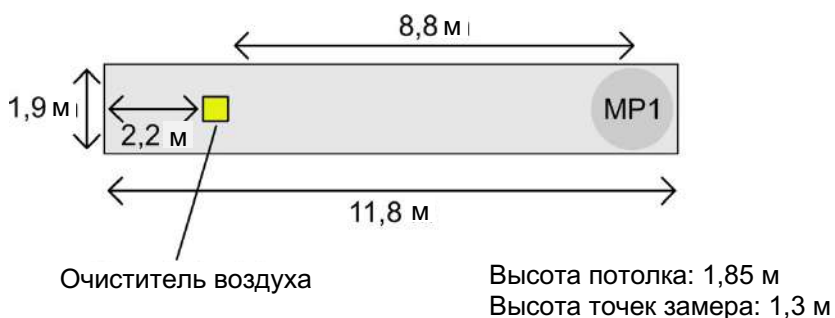


Рис. 17: Расположение компонентов в коротком коридоре для измерений концентрации аэрозоля

Величины, полученные в ходе измерений концентрации, представлены в таблицах 3 и 4. Очевидно, что даже в таких вытянутых пространствах достигается довольно быстрое осаждение частиц аэрозоля. В дальней точке измерения МР2 в длинном помещении наблюдается также значительное снижение концентрации аэрозоля, что примерно соответствует снижению концентрации в точке измерения МР1. Как и ожидалось, частицы аэрозоля в коротком коридоре осаждаются быстрее. Из этого анализа следует, что для значительно удлиненных помещений можно рекомендовать использование двух очистителей воздуха, размещенных в противоположных концах помещения.

Таблица 3: Снижение концентрации аэрозоля в длинном коридоре для различных значений объемного расхода. Скорость снижения концентрации (черный), время снижения концентрации вдвое (зеленый) и среднее время пребывания аэрозоля в помещении (голубой).

Объёмный расход	Точка замера 1	Точка замера 2
600 м³/ч	4,21 0,16 0,24	3,98 0,17 0,25
1000 м³/ч	4,83 0,14 0,21	4,49 0,15 0,22
1585 м³/ч	6,98 0,10 0,14	7,33 0,09 0,14
Скорость снижения концентрации [1/ч] время снижения концентрации вдвое [ч] среднее время пребывания [ч]		

Таблица 4: Снижение концентрации аэрозоля в коротком коридоре для различных значений объемного расхода. Скорость снижения концентрации (черный), время снижения концентрации вдвое (зеленый) и среднее время пребывания аэрозоля в помещении (голубой).

Объёмный расход	Точка замера 1
600 м³/ч	7,37 0,09 0,14
1000 м³/ч	9,91 0,07 0,10
1585 м³/ч	14,57 0,05 0,07
Скорость снижения концентрации [1/ч] время снижения концентрации вдвое [ч] среднее время пребывания [ч]	

8. Сравнение скорости осаждения для фильтров F7 и H14

Центральные системы кондиционирования для осаждения твердых частиц и обеспечения высокой чистоты воздуха, как правило, не оснащены фильтрами класса H14, а часто — только фильтрами класса F7. Таким образом, возникает вопрос: достаточно ли фильтра класса F7 для надежного и эффективного осаждения частиц аэрозоля, образующихся при дыхании, разговоре, пении, кашле и чихании? В [23] утверждается, что при двойной фильтрации воздуха в помещении фильтром класса F7 из воздушного потока удаляются в общей сложности 99% бактерий и вирусов, переносимых воздушно-капельным путем. Размер вируса SARS-CoV-2 составляет ок. 0,15 мкм, но поскольку он передается либо через капли, либо через капельные ядра, то, скорее всего, следует рассматривать степень очистки в диапазоне 0,3 – 1 мкм.

Степень очистки для фильтра класса H14 составляет 99,995 % для частиц диаметром в диапазоне менее 0,3 мкм и почти 100% для частиц бóльшего диаметра. Для фильтра класса F7 он составляет 40 — 65% в диапазоне 0,3 — 1 мкм и даже меньше в диапазоне менее 0,3 мкм. Даже десятикратная фильтрации аэрозоля фильтром класса F7 обеспечивает худший результат очистки, чем простая фильтрация с помощью фильтров класса H14. Предположение, что большой объёмный расход воздуха с использованием фильтра F7 приводит к результатам, сопоставимым с результатом для фильтра H14 при меньшем объёмном расходе, не выглядит правдоподобно для рассматриваемых размеров частиц. Следует также учитывать, что осаждение мелких частиц основано на физических свойствах, которые эффективно работают только при малой скорости потока в фильтре. Поэтому значительное увеличение объёмного расхода целесообразно только в том случае увеличения общей площади фильтра. Большой объёмный расход также неизбежно приводит к большой скорости воздуха в помещении, что, согласно рис. 2, может вызывать дискомфорт у находящихся в нем людей. Кроме того, с увеличением скоростью воздушных потоков, также увеличивается и фоновый шум от устройства. Кроме того, следует учитывать, что большая скорость воздуха в вентиляционных каналах приводит к увеличению потерь тепла и, следовательно, к увеличению энергетических затрат. С другой стороны, сопротивление обтекания фильтра класса F7 значительно меньше, чем фильтра класса H14, что свидетельствует в пользу фильтра класса F7. Для сравнения производительности двух фильтров, были проведены испытания с объёмным расходом 1000 м³/ч в помещении, показанном на рис. 17.

Таблица 5: Снижение концентрации аэрозоля в коротком коридоре для различных конфигураций фильтров. F7 + H14, только F7, без фильтра, выключенная установка.

Скорость снижения концентрации (черный), время снижения концентрации вдвое (зеленый) и среднее время пребывания аэрозоли в помещении (голубой).

Объёмный расход	Точка замера 1
1000 м ³ /h (F7 + H14)	9,91 0,07 0,10
1000 м ³ /ч (только F7)	4,15 0,17 0,24
1000 м ³ /ч (без фильтра)	0,65 1,07 1,54
0 м ³ /ч	0,66 1,05 1,52
Скорость снижения концентрации [1/ч] время снижения концентрации вдвое [ч] среднее время пребывания [ч]	

Результаты исследования показывают, что период уменьшения концентрации аэрозоля вдвое для конфигурации F7 + H14 составляет 4,2 минуты, для одного фильтра F7 - 10,2 минуты, и 64 минуты — для конфигурации без фильтра. Анализ показывает, что центральная система кондиционирования с фильтрами класса F7 приводит к хорошим показателям осаждения аэрозоля при многократной фильтрации, и поэтому имеющаяся центральная система кондиционирования должна обязательно работать с фильтрами класса F7 или выше. Тем не менее, доля свежего воздуха должна быть как можно больше, чтобы компенсировать недостаток фильтра класса H14 при осаждении небольших концентраций аэрозолей.

Если требуется быстрая и высокоэффективная фильтрация, которая надежно

фильтрует (осаждают) даже самые мелкие аэрозольные частицы, рекомендуется использовать комбинацию фильтров F7+ H14. В помещениях, в которых нет центральных систем кондиционирования и которые не слишком объемны, мобильные воздушные фильтры для помещений представляют собой очень хороший способ удаления аэрозоля из воздуха в помещении. Кроме того, такой способ лишен недостатков свободного проветривания.

9. Частицы и их инфицирующая способность

В первую очередь, в рамках этого исследования рассматривалось осаждение аэрозольных частиц диаметром в диапазоне 0,3 – 2 мкм, так как этот размер, с одной стороны, физически трудно осаждают, а с другой – этот размер, с нашей точки зрения, особенно актуален для вируса SARS-CoV-2. При рассмотрении потенциально опасных аэрозолей необходимо учитывать 2 момента. Как уже было указано выше, при определении размера аэрозольных частиц необходимо различать их влажное и сухое состояние. Изначально, частицы образуются в легких или дыхательных путях, поэтому сначала они находятся во влажном состоянии: твердые вещества (соли, белки и др.) и возможные вирусные частицы находятся в водной среде. Когда такие влажные частицы аэрозоля покидают организм, их водная фаза испаряется за короткое время при умеренной влажности окружающей среды. Для мелких частиц с диаметрами в диапазоне нескольких микрометров испарение происходит в течение долей секунды при низкой влажности окружающей среды [6]. Остаются твердые капельные ядра, содержащие очень низкий процент воды. Если упрощенно предположить, что испаряется вся вода, то диаметры сухих частиц аэрозоля, показанные на рисунке 18, выводятся исходя из диаметра влажных частиц. Представлены 3 кривые для различных типичных массовых долей твердого вещества 1, 3 и 5% [31]. Плотность воды была принята за 1000 кг/м^3 , плотность твердых веществ — 1300 кг/м^3 .

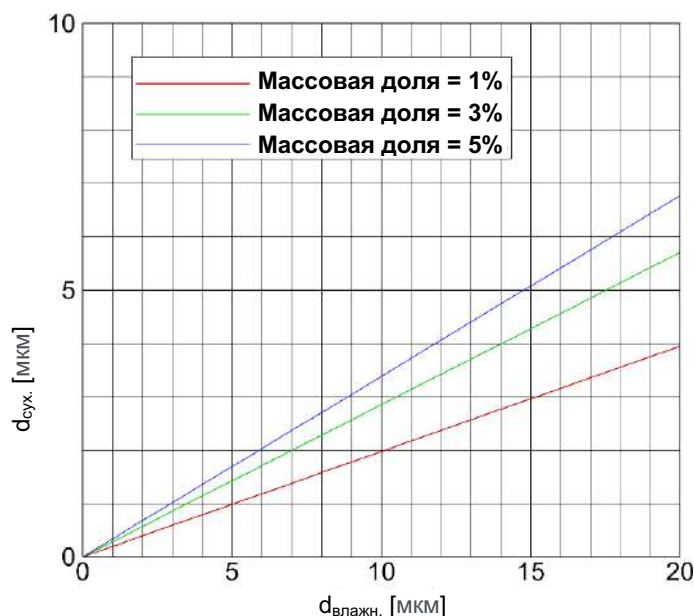


Рис. 18: диаметр высушенных частиц аэрозоля в зависимости от начального диаметра влажных частиц аэрозоля для 3 различных массовых долей твердых частиц

Диаметр высвобождаемых аэрозольных частиц обычно находится в пределах менее 10 мкм, при этом максимальное распределение по размерам составляет

приблизительно 1 мкм [32, 33]. При прямом инфицировании диаметры имеют решающее значение, но для непрямого инфицирования следует учитывать диаметры, указанные на рисунке 18 для соответствующих массовых долей твердых веществ. Для фильтрации при умеренной влажности последние также актуальны. Таким образом, размер аэрозольных частиц, которые должны быть осаждены, находится в диапазоне 0,3 – 3 мкм, согласно рисунку 18, причем, согласно этому расчету, подавляющий размер аэрозольных частиц составляет ок. 0,3 мкм. Таким образом, распределение аэрозолей по размерам, которое мы рассматривали в данном исследовании, является весьма актуальным в отношении инфекции SARS-COV-2.

Кроме того, возникает вопрос, какова вероятность того, что аэрозольная частица вообще содержит в себе вирусный материал. Для этого была проведена простая оценка, при которой концентрация вирусов [вирусы/мл] была связана с количеством частиц аэрозоля на объем [капли/мл] при определенном диаметре частиц. Результат этого расчета показан на рисунке 19. Указаны вероятности для 4 различных концентраций вирусов, возникающих в результате [34]. Согласно этим исследованиям, 7×10^6 вирусов/мл являются средней концентрацией вирусов, а $2,35 \times 10^9$ вирусов/мл — максимальной концентрацией вирусов в слизистой оболочке дыхательных путей. Можно заметить, что даже небольшие аэрозольные частицы имеют лишь небольшую вероятность переноса вируса. Таким образом, не каждая аэрозольная частица, выделяемая инфицированным человеком, является инфекционной.

Далее, если предположить, что сухая аэрозольная частица имеет диаметр 1 мкм, то на рисунке 18 при доле твердого вещества 1% получается диаметр влажной частицы 5 мкм. При концентрации вирусов в слизистой дыхательных путей от ок. 1×10^9 вирусов/мл, следует вероятность, что такой аэрозоль содержит около 7% частиц вируса. Таким образом, только около каждой 14-я аэрозольная частица является инфекционной. С другой стороны, в воздухе помещения преобладают как раз небольшие частицы аэрозоля, поэтому ими нельзя пренебрегать, особенно если вы долгое время находитесь в помещении, загрязненном инфекционным аэрозолем. Таким образом, очень хорошее и эффективное осаждение аэрозольных частиц малого диаметра или хороший приток свежего воздуха для разбавления вирусной нагрузки в помещении очень важны для минимизации риска непрямого заражения.

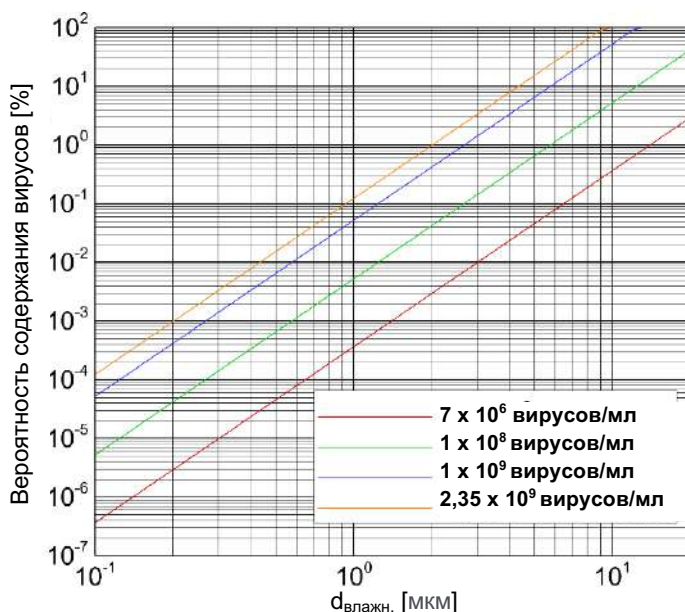


Рис. 19: Результат простой оценки вероятности того, что влажная аэрозольная частица содержит вирус

Вывод и заключение

Количественные результаты измерений показывают, что при использовании тестируемого очистителя воздуха TROTEC TAC V+, благодаря большому объемному расходу и комбинации фильтров класса F7 + H14, концентрация аэрозоля может быть уменьшена вдвое даже в помещениях площадью 80 м² в зависимости от расхода, за 6 – 15 минут. В помещениях площадью 20 м² сокращение концентрации аэрозоля вдвое, в зависимости от объемного расхода, происходит за 3 – 5 минут. Таким образом, с помощью очистителей воздуха можно поддерживать концентрацию аэрозоля на низком уровне в помещениях малого и среднего размера без каких-либо проблем.

Даже в помещении длиной 22 метра и площадью более 40 м², при максимальном объемном расходе снижение концентрации аэрозоля вдвое может произойти в течение примерно 5 минут. В больших помещениях, а также в помещениях с большим количеством объектов или с очень неблагоприятной геометрией следует, при необходимости, применять несколько очистителей воздуха для помещений, чтобы своевременно очистить воздух во всех частях. Из-за инфекционной опасности SARS-CoV-2, кратность воздухообмена, на наш взгляд, должна составлять не менее 4 – 8.

Чтобы обеспечить максимально эффективную фильтрацию воздуха в помещении, необходимо поместить очиститель воздуха посередине самой длинной стены помещения. Кроме того, площадь потолка в направлении исходящих из очистителя потоков, по возможности, не должна преграждаться объектами, иначе распространение пристеночной струи будет затруднено, и в помещении могут образоваться вихревые потоки. При неблагоприятных условиях эксплуатации объемный расход должен быть увеличен, чтобы обеспечить надлежащую производительность фильтра. Также рекомендуется использовать устройство в непрерывном режиме, а не эпизодически, чтобы избежать повышенной концентрации вирусов в помещении.

Мощные очистители воздуха для помещений с комбинацией фильтров F7 + H14 могут поддерживать концентрацию аэрозоля в помещениях малого и среднего размера на

низком уровне, и поэтому риск непрямого заражения может быть значительно снижен даже при закрытых окнах и без соответствующей центральной системы кондиционирования. Поэтому они очень хорошо подходят для использования, например, в зонах очереди, в классах, в магазинах или в процедурных кабинетах, обеспечивая постоянную низкую вирусную нагрузку без необходимости открытия окон, что снизило бы уровень комфорта в помещении. Кроме того, в отличие от свободного проветривания при помощи окон, очистители также гарантируют реальное снижение вирусной нагрузки, что часто не может быть гарантировано при помощи свободного проветривания. Они также имеют преимущество перед центральными системами кондиционирования, которые работают без подачи свежего воздуха или с низким количеством свежего воздуха: вирусы фильтруются и не распространяются в здании по воздушным каналам.

Чтобы очиститель воздуха не превращался в «рассадник» вирусов, фильтр H14 нагревается примерно до 100°C один раз в день в течение 30 минут, уничтожая вирусы на фильтре и предотвращая образование биопленок, скопление бактерий и грибков, без использования вредных химических добавок или УФ-излучения.

В заключение следует подчеркнуть: хотя очистители воздуха для помещений, открытые окна и мощные центральные системы кондиционирования являются подходящими инструментами для борьбы с риском непрямого заражения, они не могут уменьшить прямой риск заражения, который может быть вызван кашлем или длительным разговором на коротких расстояниях. Поэтому важно продолжать соблюдать достаточно большую дистанцию от других людей и носить маски, закрывающие рот и нос, или респираторы, фильтрующие частицы, чтобы избежать прямого инфицирования.

Примечание

Исследования проводились при финансовой поддержке компании TROTEC GmbH («ТРОТЕК ГмбХ»), г. Хайнсберг. Очиститель воздуха в помещении TAC V+ был предоставлен компанией TROTEC. Исследования проводились в соответствии с передовой научной практикой. Поддержка со стороны компании TROTEC не влияет на представленные результаты.

Literatur

- [1] Jayaweera M, Perera H, Gunawardana B, Manatunge J (2020) Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy. *Environ Res.* 2020 Sep; 188: 109819. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109819>
- [2] Morawska L, Cao J (2020) Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environment International*, Volume 139, 105730
- [3] Zhang R, Lib Y, Zhang AL, Wang Y, Molina MY (2020) Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19. *PNAS* (2020), 10.1073/pnas.2009637117, first published June 11
- [4] Lu J et al. (2020) COVID-19 Outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, 2020. *Emerging Infectious Diseases*, www.cdc.gov/eid, Vol. 26, No. 7, DOI: <https://doi.org/10.3201/eid2607.200764>
- [5] Kähler CJ, Hain R (2020) Fundamental protective mechanisms of face masks against droplet infections. *Journal of Aerosol Science* 148:105617, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105617>
- [6] Kähler CJ, Hain R (2020) Strömungsanalysen zur SARS-CoV-2 Schutzmaskendebatte. <https://www.unibw.de/lrt7/stroemungsanalysen-zur-sars-cov-2-schutzmaskendebatte>
<https://youtu.be/SM2QrPFC3MY>
- [7] Kähler CJ, Hain R (2020) Musizieren während der Pandemie - was rät die Wissenschaft? <https://www.unibw.de/lrt7/musizieren-waehrend-der-pandemie>
<https://youtu.be/0JmcjRhV-rs>
- [8] Wells WF, M.W. Wells MW (1936) Air-bone infection. *Journal A. M. A.*, Cambridge, pp. 1698–1703
- [9] Soper GA (1919) The lessons of the pandemic. *Science*, 49, pp. 501–506
- [10] Fernstrom A, Goldblatt M (2013) Aerobiology and its role in the transmission of infectious diseases. *Journal of Pathogens*, Volume 2013, article ID 493960, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/493960>
- [11] Doremalen van N, Bushmaker T, Morris DH, Holbrook MG, Gamble A, Williamson BN, Tamin A, Harcourt JL, Thornburg NJ, Gerber SI, Lloyd-Smith JO, de Wit E, Munster VJ (2020) Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *New England Journal of Medicine* 382:1564–1567, <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>
- [12] Pyankov OV, Bodnev SA, Pyankova OG, Agranovski IE (2018) Survival of aerosolized coronavirus in the ambient air. *Journal of Aerosol Science* 115:158–163, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.09.009>
- [13] Morawska L, Milton DK (2020) It is Time to Address Airborne Transmission of COVID-19. *Clinical Infectious Diseases*, ciaa939, <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa939>
- [14] Klompas M, Baker MA, Rhee C (2020) Airborne Transmission of SARS-CoV-2 - Theoretical Considerations and Available Evidence. *JAMA*. Published online July 13, doi:10.1001/jama.2020.12458

- [15] McKie R (2020) Did singing together spread coronavirus to four choirs? 17. May, The Guardian / The Observer, <https://www.theguardian.com/world/2020/may/17/did-singing-together-spread-coronavirus-to-four-choirs>
- [16] Heinz E (2016) Wohnraumlüftung – frei und ventilatorgestützt. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich
- [17] von Pettenkofer M (1858) Besprechung allgemeiner auf die Ventilation bezüglicher Fragen. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. J.G. Cotta'sche Buchhandlung, München
- [18] DIN EN 16798 – Gebäude-Energieeffizienz mit LüKK-Systemen
- [19] VDI 2082 – Raumluftechnik Verkaufsstätten (VDI-Lüftungsregeln)
- [20] DIN 1946-4 – Raumluftechnik im Gesundheitswesen
- [21] Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene (2002) Leitlinienentwurf: Ausführung und Betrieb von raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) in Krankenhäusern. Hyg Med 27. Jahrgang 2002 – Heft 3
- [22] Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene (2015) Krankenhaushygienische Leitlinie für die Planung, Ausführung und den Betrieb von Raumluftechnischen Anlagen in Räumen des Gesundheitswesens. Hyg Med 2015; 40 – 12
- [23] Fachverband Gebäude-Klima e. V. (2020) Betrieb Raumluftechnischer Anlagen unter den Randbedingungen der aktuellen Covid-19-Pandemie. 03.08.2020, Version 3, www.fgk.de/images/Aktuelles/2020/08-20/RLT_Covid19_V3_200803.pdf
- [24] Etheridge D, Sandberg M (1996) Building Ventilation: Theory and Measurement. Wiley ISBN: 978-0-471-96087-4
- [25] Etheridge D (2011) Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design. Wiley ISBN: 978-0-470-66035-5
- [26] DIN 1946 Teil 2 (1994) Raumluftechnik: Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)
- [27] <https://de.trotec.com/produkte-services/maschinen-highperformance/luftreinigung/raumluftreiniger-tac-v/>
- [28] Raffel M, Willert CE, Scarano F, Kähler CJ, Wereley ST, Kompenhans J (2018) Particle Image Velocimetry: a practical guide. Springer, 3. Auflage, ISBN-10: 9783319688510
- [29] Kähler CJ, Sammler B, Kompenhans J (2002) Generation and control of tracer particles for optical flow investigations in air. Experiments in Fluids 33:736–742
- [30] Küpper M, Asbach C, Schneiderwind U, Finger H, Spiegelhoff D, Schumacher S (2019) Testing of an indoor air cleaner for particulate pollutants under realistic conditions in an office room. Aerosol and Air Quality Research 19:1655–1665, doi: 10.4209/aaqr.2019.01.0029
- [31] Stadnytskyi V, et al. (2020) The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission. PNAS 117:11875–11877
- [32] Lee J, Yoo D, Ryu S, Ham S, Lee K, Yeo M, Min K, Yoon C (2019) Quantity, size distribution, and characteristics of cough generated aerosol produced by patients with an upper respiratory tract infection. Aerosol and Air Quality Research, 19, pp. 840–853

Версия от 05.08.2020:

- [33] Johnson GR, Morawska L, Ristovski, ZD, et al. (2011) Modality of human exposed aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science* 42:839–851
- [34] Wölfel R, et al. (2020) Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019. *Nature* 581:465–469