

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco640885>

Влияние систем вентиляции на риск распространения вирусов (обзорная статья)

Д.В. Абрамкина, В. Верма

Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Понимание механизма аэрозольной передачи респираторных инфекционных заболеваний имеет важное значение для прогнозирования воздушного режима помещений при проектировании систем вентиляции. Поиск теоретических исследований производили с помощью различных комбинаций ключевых слов в базе данных PubMed. В выборке были представлены статьи по влиянию параметров внутреннего микроклимата и условий работы вентиляционных систем на риск распространения вирусов. С 2020 г. наблюдается повышенный интерес к изучению механизма распространения вирусных инфекций посредством аэрозольной передачи внутри зданий и объектов транспортной инфраструктуры с учётом условий эксплуатации инженерных систем. В настоящее время существует серьёзная доказательная база зависимости жизнеспособности вирусных аэрозолей от температурно-влажностного режима помещений. Поддержание оптимальной относительной влажности воздуха от 40 до 60% при стандартной комнатной температуре необходимо не только с точки зрения стабильности аэрозольных систем, но и нейтрализации вирусов. Выявлено недостаточное количество исследований по влиянию подвижности и загрязнения внутренней среды на стабильность вирусных патогенов. Представлена значительная выборка статей, подтверждающих влияние эффективности работы вентиляционных систем на инфекционную нагрузку в зданиях. Для снижения риска распространения респираторных вирусов необходимо обеспечивать расход воздуха не менее 30 м³/ч на человека. На основе проведённых теоретических исследований была разработана система практических рекомендаций по режиму работы систем вентиляции в условиях роста заболеваемости. Выявлены отклонения международных и российских нормативно-технических требований по обеспечению комфортных параметров внутреннего микроклимата и качества воздушной среды с точки зрения уменьшения риска распространения респираторных заболеваний.

Ключевые слова: вентиляция; вирус; загрязнители окружающей среды; аэрозоль.

Как цитировать:

Абрамкина Д.В., Верма В. Влияние систем вентиляции на риск распространения вирусов (обзорная статья) // Экология человека. 2024. Т. 31, № 6. С. 419–428. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco640885>

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco640885>

The impact of ventilation systems on the risk of viral transmission (review article)

Darya V. Abramkina, Vishal Verma

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ABSTRACT

Understanding the aerosol transmission mechanism of respiratory infectious diseases is crucial for predicting indoor air circulation and optimizing ventilation system design. A literature search was conducted using various keyword combinations in the PubMed database. The selection included studies examining the impact of indoor microclimate parameters and ventilation system performance on the risk of viral transmission. Since 2020, there has been increasing interest in studying how viral infections spread via aerosols within buildings and transportation infrastructure, considering the operational conditions of engineering systems. Currently, substantial evidence supports the dependence of viral aerosol viability on indoor temperature and humidity levels. Maintaining an optimal relative humidity of 40–60% at standard room temperature is essential not only for aerosol stability but also for virus neutralization. However, there is a lack of studies investigating the effects of air mobility and indoor pollution on the stability of viral pathogens. A significant body of literature confirms the influence of ventilation system efficiency on infection risk in buildings. To reduce the spread of respiratory viruses, an air exchange rate of at least 30 m³/h per person is recommended. Based on the findings, a set of practical recommendations for ventilation system operation amidst increased disease incidence has been developed. Discrepancies between international and Russian regulatory requirements regarding indoor climate parameters and air quality standards have been identified, emphasizing the need for improved measures to mitigate the spread of respiratory infections.

Keywords: ventilation; virus; environmental pollutants; aerosol.

To cite this article:

Abramkina DV, Verma V. The impact of ventilation systems on the risk of viral transmission (review article). *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2024;31(6):419–428. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco640885>

Received: 02.11.2024

Accepted: 26.11.2024

Published online: 12.01.2025

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco640885>

通风系统对病毒传播风险的影响（综述）

Darya V. Abramkina, Vishal Verma

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

摘要

了解呼吸道传染病的气溶胶传播机制对于预测室内空气流动模式和优化通风系统设计至关重要。本研究基于 PubMed 数据库，采用多种关键词组合进行文献检索，筛选了研究室内微气候参数和通风系统运行条件对病毒传播风险影响的相关论文。自 2020 年以来，关于建筑物及交通基础设施内病毒气溶胶传播机制的研究逐渐增多，并开始关注工程系统的运行条件对病毒扩散的影响。现有研究证实，病毒气溶胶的存活能力与室内温湿度条件密切相关。维持 40 - 60% 的相对湿度及标准室温不仅有助于降低气溶胶的稳定性，还可有效降低病毒的活性。然而，关于空气流动特性及室内污染物对病毒病原体稳定性影响的研究仍较为有限。此外，大量文献证实通风系统的效率对建筑物内感染风险有直接影响。为降低呼吸道病毒的传播风险，建议通风量至少达到每人 30 m³/h。基于本综述的研究结果，制定了在呼吸道疾病流行期间优化通风系统运行的实践建议。此外，本研究还分析了国际和俄罗斯在室内气候参数及空气质量要求方面的法规差异，强调了优化通风措施在减少呼吸道疾病传播中的关键作用。

关键词：通风；病毒；环境污染物；气溶胶。

引用本文：

Abramkina DV, Verma V. 通风系统对病毒传播风险的影响（综述）. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2024;31(6):419–428.

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco640885>

收到: 02.11.2024

接受: 26.11.2024

发布日期: 12.01.2025

ОБОСНОВАНИЕ

Представлен систематический обзор данных о влиянии систем вентиляции на распространение вирусов в зданиях. Около 90% зарегистрированных случаев инфекционных заболеваний связаны с острыми респираторными инфекциями [1]. За последние 20 лет зарегистрировано несколько крупных вспышек респираторных болезней, вызванных аэрозольными патогенами [2]. Высокая интенсивность распространения и длительная стойкость аэрозолей воздуха в помещениях приводят к резкому росту числа заболевших.

Значительное число случаев заболеваний Ближневосточным респираторным синдромом (MERS-CoV) и коронавирусом (COVID-19) продемонстрировало высокий уровень инфекций, связанных с внутрибольничным распространением. Установлено, что 41% больных, инфицированных COVID-19, получили его во время лечения [3]. Распространённость респираторных инфекций среди медицинского персонала составляет от 0,3 до 43,3%. Согласно государственному докладу о здравоохранении, вспышки внутрибольничных инфекций в медицинских организациях, зарегистрированные в 2023 г. в России, связаны главным образом с передачей вируса через воздух (79,11%). Во время пандемии COVID-19 в 2020 г. зарегистрирован пик показателей инфицирования, который достиг 130 803 случая. Инфекции верхних и нижних дыхательных путей являются наиболее распространёнными видами внутрибольничных инфекций [4–6].

Понимание механизма распространения инфекционных заболеваний с помощью аэрозолей имеет решающее значение для прогнозирования воздушного режима помещений и проектирования систем вентиляции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки влияния систем вентиляции на риск передачи инфекционных заболеваний необходимо рассмотреть возможные механизмы распространения патогенов внутри помещений с учётом стабильности вирусов при различных параметрах микроклимата помещений.

Поиск теоретических исследований производили в базе данных PubMed по ключевым словам. Выборку научных исследований составили из статей типа Review и Systematic Review, имеющих полнотекстовые версии в открытом доступе.

При задании запроса по ключевым словам «virus» AND «aerosol transmission» было получено 510 результатов за последние 10 лет. Из них 393 статьи изданы в 2020 и 2021 гг., что обусловлено высокой актуальностью тематики исследования в условиях пандемии COVID-19. Анализ наиболее релевантных источников позволил выявить факторы, влияющие на механизм аэрозольного распространения вирусов в помещениях: состав воздушной среды, температура, относительная влажность и подвижность воздуха, кратность и схема организации

воздухообмена систем вентиляции. Следующим этапом было составление выборки исследований по каждому параметру, например: («virus» AND «aerosol transmission») AND («relative humidity» OR «RH»).

Добавление слова «ventilation» сузило выборку до 89 статей с 2006 г. Из них исключили повторяющиеся статьи и вручную выбрали исследования, релевантные рассматриваемой тематике, поскольку термин «ventilation» зачастую используется в контексте методов респираторной терапии (искусственная вентиляция лёгких). В итоге к рассмотрению было принято 47 научных исследований.

Интересным фактом является то, что влияние систем вентиляции на риск распространения патогенных аэрозолей практически не рассматривалось до 2020 г. Лишь две статьи с 2006 по 2020 г. упоминают связь между увеличением уровня заболеваемости и эффективностью работы систем вентиляции [7, 8]. С 2020 г. наблюдается повышенный интерес к изучению механизма распространения вирусных инфекций внутри зданий и объектов транспортной инфраструктуры с учётом условий эксплуатации инженерных систем.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Аэрозольные пути передачи вирусных патогенов

К основным путям передачи вирусных заболеваний в здании можно отнести перекрёстное распространение патогенов от заболевшего человека, перетекание инфекции из заражённого помещения в коридор и смежные комнаты, транспортирование загрязнённого воздуха посредством систем вентиляции, передача вирусов через fomites. Более ранние исследования подвергают сомнению возможность передачи вирусных респираторных инфекций с помощью аэрозолей [7]. Однако анализ вспышек заболеваний позволил выявить влияние воздушного режима помещений и эффективности работы систем вентиляции на передачу патогенов, которая возможна только при аэрозольном распространении инфекции в многоквартирных жилых домах [8, 9], предприятиях общественного питания [10], магазинах [11], фитнес-центрах [12] и общественном транспорте [13].

Аэрозоль представляет собой дисперсную систему, состоящую из взвешенных частиц в газовой среде. При дыхании, разговоре, чихании и кашле человек выделяет мелкие капельки жидкости, содержащие возбудителей вирусных заболеваний. Термин «аэрозоль» относится к частицам любого размера, которые могут находиться в сложившихся микроклиматических условиях во взвешенном состоянии. Диапазон изменения размеров частиц может составлять 5–6 порядков. Минимальным размером аэрозоля являются молекулярные кластеры, содержащие не менее 6–10 молекул, которые, с одной стороны,

обладают значительной устойчивостью, а с другой стороны — способны не отскакивать от поверхности при столкновении с ней и необратимо прилипать. Мелкодисперсные системы аэрозолей (менее 50 мкм) являются наиболее опасными с точки зрения распространения заболевания. Они обладают высокой стабильностью витания и возможностью проникновения в нижние дыхательные пути, а также способствуют увеличению риска контактной передачи вирусов через фомиты. Частицы менее 20 мкм легко проникают в организм через гортань, менее 5–6 мкм — в альвеолярное пространство, что является характерным для таких вирусных заболеваний, как MERS-CoV [14].

Верхняя граница размеров аэрозолей может быть определена исходя из динамического поведения и устойчивости частиц дисперсной системы. В настоящее время формируется новая теория, что патогенными биоаэрозолями могут являться частицы с размером до 100 мкм [15, 16]. Локальные конвективные потоки воздуха, формирующиеся в помещении при кашле и чихании, распространяют аэрозольные частицы на расстояния свыше 2 м [17, 18].

Аэродинамика аэрозольных частиц в помещении определяется воздействием на взвешенные частицы различных внешних и внутренних факторов: сил гравитации и инерции, броуновского движения, электрофоретических и термических сил. При рассмотрении патогенных биоаэрозолей необходимо учитывать не только физические характеристики, влияющие на стабильность систем, но и учитывать биологическую инактивацию вирусов под влиянием окружающей среды.

Влияние параметров микроклимата на риск распространения вирусов

Температурно-влажностный режим помещения

Определение взаимосвязи между температурно-влажностным режимом помещения и динамикой вирусных аэрозолей является сложной междисциплинарной задачей, которая сводится к определению физико-химических свойств отдельного типа вирусного заболевания.

Риск распространения респираторных заболеваний выше в странах с холодными климатическими условиями, что вызвано не только ослаблением иммунитета при отрицательных температурах, но и низким влагосодержанием воздуха [19]. Жаркие и влажные климатические регионы, особенно в сезон дождей, менее подвержены вспышкам заболеваний, обусловленных аэрозольной передачей вирусов. Однако в условиях тропического климата повышается возможность контактного заражения [20].

Инактивация респираторных вирусов в результате денатурирования белков и нуклеиновых кислот происходит при высоких температурах воздуха — от 27 до 70 °C [21]. Данная температура превышает диапазон допустимых параметров воздуха в помещении, поэтому в дальнейшем этот фактор к рассмотрению не принимается.

Относительная влажность воздуха в помещении (ϕ , %) является одним из ключевых параметров, определяющих

стабильность биоаэрозольной системы. Относительная влажность влияет не только на количество частиц, остающихся во взвешенном состоянии при дыхании и кашле, но и на выживаемость вирусов в аэрозоле [20]. При повышении относительной влажности воздуха испарение выдыхаемых капель замедляется, что приводит к повышенной концентрации крупных аэрозольных частиц, которые за счёт гравитационных сил начинают оседать. В идеальных условиях при рассмотрении изолированной капли в неподвижном воздухе оседание патогенных частиц будет происходить с незначительной скоростью [22]. Наличие турбулентных потоков, вызванных перемещением людей в помещении, открытием дверей, осуществлением проветривания и работой вентиляционных систем, уменьшает время испарения капли, увеличивая дальность её полёта и время осаждения [23]. Снижение относительной влажности приводит к усиленному испарению влаги с поверхности частиц аэрозоля и образованию капельных ядер, которые могут длительное время оставаться во взвешенном состоянии, перенося инфекционные заболевания в течение нескольких часов [24].

Поддержание требуемой относительной влажности необходимо не только с точки зрения стабильности аэрозольных систем, но и для нейтрализации вирусов. Исследователи выделяют различные зависимости жизнеспособности вирусов от относительной влажности воздуха: растущая инаktivация с увеличением ϕ , снижающаяся инаktivация при увеличении ϕ , U-образная жизнеспособность [21]. Для респираторных вирусов (гриппа и SARS-CoV-2) характерна U-образная жизнеспособность [25–27], что позволяет определить границы оптимальной относительной влажности воздуха в помещении. Таким образом, идеальная влажность для предотвращения аэрозольной передачи респираторных инфекций при комнатной температуре составляет 40–60% [28, 29].

В нормативно-технических документах Российской Федерации (ГОСТ 30494–2011, ГОСТ 12.1.005–88) предъявляются требования к оптимальной и допустимой относительной влажности в холодный и тёплый периоды года. Для жилых и общественных зданий оптимальная относительная влажность в зимнее время должна находиться в диапазоне 30–45%, в летнее время — 30–60%, а допустимая относительная влажность должна составлять не более 60 и 65% соответственно. Для производственных зданий параметры микроклимата помещений зависят от степени тяжести выполняемых работ. Оптимальные значения относительной влажности в течение года принимаются 40–60%, допустимые — не более 75%. При проектировании систем вентиляции в обслуживаемой зоне помещений необходимо поддерживать допустимые параметры. Обеспечение наиболее комфортных оптимальных критериев возможно при наличии технического задания или экономического обоснования. В холодный период года в большинстве зданий не создаются необходимые условия для поддержания требуемых значений

относительной влажности для снижения риска распространения респираторных вирусов.

Подвижность воздуха в рабочей зоне помещения

Наряду с температурой и относительной влажностью, скорость движения воздуха в рабочей зоне (подвижность) оказывает значительное влияние на теплофизическое состояние среды помещения.

Воздух в вентилируемом помещении находится в непрерывном движении. При недостаточной равномерности воздухораспределения в помещении могут формироваться локальные застойные зоны, характеризующиеся повышенной температурой и концентрацией вредных веществ. При низкой подвижности в рабочей зоне вокруг человека образуется тонкая малоподвижная воздушная оболочка, которая быстро насыщается выдыхаемыми парами влаги и имеет повышенную температуру.

При увеличении скорости движения воздуха патогенный аэрозоль начинает интенсивно распространяться по помещению, тем самым увеличивая риск заражения людей, находящихся на расстоянии от источника заболевания [30]. С другой стороны, рост подвижности воздуха приводит к увеличению скорости испарения и образованию капельных ядер, что увеличивает скорость оседания аэрозольных частиц. В настоящее время вопрос об оптимальной скорости движения воздуха в рабочей зоне с точки зрения риска распространения вирусов остаётся недостаточно изученным. В рассмотренной выборке научных исследований не обнаружен диапазон рекомендуемой подвижности воздуха для снижения возможности заражения воздушно-капельным путем.

Качество воздушной среды в помещении

Низкое качество воздушной среды и повышенный уровень запылённости способствуют увеличению темпа распространения вирусов [31] и косвенно повышают уровень смертности от респираторных заболеваний [32].

В воздухе закрытых помещений могут содержаться летучие органические смеси, различные биологические загрязнители, пары, газы и пыль. Инфицированный человек при разговоре, дыхании и кашле выделяет аэрозольное облако, которое, распространяясь по помещению, может оседать не только на ограждающих конструкциях, мебели и технологическом оборудовании, но и связываться с загрязняющими агентами в воздухе. Мелкодисперсные частицы пыли РМ 2.5 являются переносчиками вирусных патогенов, проникая глубоко в дыхательные пути человека [33]. Наличие органических поверхностно-активных веществ в воздухе способствует стабилизации и продлению жизнеспособности вирусных аэрозолей [34].

Все вышеперечисленные факторы, обуславливающие интенсивность распространения и стабильность вирусных аэрозолей зависят от эффективности работы инженерных систем в здании. Далее в настоящем исследовании

выделены основные способы снижения инфекционной нагрузки помещений посредством систем вентиляции.

Влияние работы систем вентиляции на риск распространения вирусов

После пандемии COVID-19 многие международные организации по стандартизации и ассоциации инженеров определяют потребность обустройства «надлежащей вентиляции» закрытых помещений для снижения инфекционной нагрузки [35]. К сожалению, в настоящий момент существует недостаточное количество научных исследований, направленных на разработку конкретных мероприятий по изменению условий эксплуатации систем вентиляции при повышенных уровнях заболеваемости. Общие руководящие принципы включают в себя уменьшение численности людей в помещении, периодические проветривания и увеличение кратности воздухообмена [36–38]. Однако до сих пор не разработана система практических рекомендаций по внедрению особого режима работы вентиляционных систем жилых, общественных и административных зданий для снижения риска распространения вирусов.

Механические и естественные системы вентиляции

Дополнительная организация естественной вентиляции является хорошей мерой для снижения вирусной нагрузки в помещениях. В детских садах, школах, университетах и офисах рекомендуется производить обязательное проветривание помещений во время перерывов. Для планировок, имеющих окна, выходящие на разные фасады, необходимо обеспечивать естественную сквозную (перекрёстную) вентиляцию. Результаты исследований показывают, что сквозная вентиляция значительно снижает вирусную нагрузку: за 15 мин при стабильной скорости движения воздушного потока 1,5 м/с количество вирионов уменьшается с 10 000 до 0 для помещения площадью 100 м² [39]. Односторонняя вентиляция обладает меньшей эффективностью, однако она также позволяет снизить вирусную нагрузку вдвое.

В зимнее время наружный воздух зачастую обладает низким влагосодержанием. При естественном проветривании он поступает в помещение через открытые окна и форточки, нагревается от системы отопления. Потребление тепловой энергии в жилых и общественных зданиях при этом может составлять до 35% годового использования [40]. При этом относительная влажность стремительно уменьшается и может достигать 10–15%. Как было рассмотрено ранее, при низкой относительной влажности происходит уменьшение размера аэрозольных частиц вследствие испарения их водяной оболочки. При достижении размеров частиц менее 50 мкм их тяжело уловить и обеспечить эффективное удаление с помощью систем вентиляции [41].

При рассмотрении возможности использования естественной вентиляции в здании в первую очередь необходимо обеспечить оценку качества наружной среды. Применение периодического проветривания в районах

с высокой загрязнённостью воздуха взвешенными частицами может повлиять на качество воздушной среды помещения и эффективность удаления вирусных аэрозольных агентов. Степень распространённости респираторных заболеваний увеличивается при повышенных концентрациях взвешенных частиц в воздухе [42]. Как показывают результаты исследований запылённости воздушной среды в помещениях музеев [43], применение местных увлажнителей барабанного типа позволяет не только обеспечить и поддержать оптимальную относительную влажность (от 40 до 60%), но и заметно снизить содержание мелкодисперсных частиц в воздухе. Наибольшее снижение концентрации пыли (свыше 70 %) наблюдается для частиц размером от 2,5 до 10,0 мкм. В основе работы барабанных устройств применяется принцип естественного испарения, благодаря чему превышение относительной влажности воздуха более 60% является невозможным. Местные увлажнители воздуха позволяют снизить жизнеспособность аэрозольных респираторных вирусов.

Централизованные системы вентиляции и кондиционирования воздуха повышают риск распространения аэрозольных инфекций по высоте здания, особенно в многоэтажных жилых комплексах, оборудованных вытяжными системами естественной вентиляции со сборными вертикальными каналами и тёплыми чердаками. При неблагоприятных погодных условиях возможно формирование эффекта обратной тяги, при котором загрязнённый воздух из вентиляционных каналов через вытяжные решётки проникает в квартиру [44].

Механические системы вентиляции обеспечивают эффективную подачу чистого приточного воздуха и удаление вредных выделений из помещения. Однако ошибки при проектировании, монтаже и эксплуатации систем могут привести к трагической ситуации, когда вентиляция сама становится источником заражения. При обследовании больничных палат [45, 46] пробы ПЦР из вентиляционных решёток и вытяжных установок показали положительные результаты, что доказывает возможность распространения вирусов посредством сети воздуховодов и их накопления на оборудовании. Несвоевременная замена фильтров, отсутствие очистки и дезинфекции воздуховодов приводят к транспортировке микроорганизмов и всплеску заболеваний в зданиях. Наибольшие проблемы при этом возникают в системах с рециркуляцией воздуха, поскольку стандартные фильтры грубой очистки, применяемые в общественных зданиях, не способны эффективно удалять частицы размером менее 5 мкм. Таким образом, в условиях роста заболеваемости рекомендуется проводить обязательный осмотр и очистку вентиляционных систем, а также обеспечивать переход на прямоточные схемы обработки воздуха.

Требуемая кратность воздухообмена

Экспертная группа по COVID-19 выделила три основных фактора, обуславливающих возможность возникновения вспышек заболевания в зданиях: наличие закрытых

помещений с недостаточным воздухообменом, переполненные комнаты с массовым пребыванием людей и близкий контакт [47]. Увеличение кратности воздухообмена способствует снижению инфекционной нагрузки в помещениях. Рекомендованное значение расхода воздуха, приходящегося на одного человека, составляет не менее 30 м³/ч [47]. Эта цифра основана на многолетнем опыте в области гигиены помещений и безопасности труда и должна рассматриваться как основное требование. Согласно нормативно-техническим документам по проектированию систем вентиляции в России (СП 60.13330.2020), минимальный воздухообмен для помещений с непостоянным пребыванием людей должен составлять не менее 20 м³/ч, что ниже международного рекомендованного значения. В особую зону риска попадают помещения с массовым и кратковременным пребыванием людей: кинотеатры, театры, залы ожидания аэропортов и вокзалов, торговые центры. Даже отсутствие длительного контакта не исключает возможность передачи заболевания, поскольку вирусы могут оставаться инфекционными в аэрозолях в течение нескольких часов [48]. Обнаружение высоких концентраций вируса COVID-19 в столовых, конференц-залах и туалетных комнатах подтверждает возможность перекрёстной передачи вирусов при непродолжительном времени нахождения в помещении [49, 50].

Рекомендуемый минимальный расход воздуха для предотвращения вспышек заболеваний должен учитывать вирулентность инфекционных агентов. Для определения нормативного расхода воздуха при рассмотрении дельта-варианта SARS-CoV2 может потребоваться установить большую интенсивность воздухообмена с учётом требований по обеспечению оптимальной подвижности воздуха в помещении для превентивной защиты от инфекции [51].

Схемы организации воздухообмена

Контроль движения воздушных потоков в помещениях является неотъемлемой задачей при обеспечении высокого качества воздушной среды. Результаты исследований показывают, что изменения общего и локального рисков заражения воздушно-капельным путём при различных схемах воздухораспределения являются сложными и нелинейными [52].

Применение смешанного воздухораспределения при подаче и удалении воздуха «сверху вверх» в идеальных условиях приводит к равномерному распределению температуры и концентрации вредных веществ по объёму помещения. С одной стороны, такая схема организации воздухообмена позволяет разбавить концентрацию аэрозоля, но с другой стороны — при недостаточном воздухообмене может быстро распространить инфекцию по помещению [53]. В случаях значительных расходов воздуха в небольших по площади помещениях (например, в кафе и ресторанах с плотной посадкой) бывает близкое расположение приточных и вытяжных устройств. Приточный воздух, поступая в помещение, не успевает опуститься

в рабочую зону под воздействием вытяжных устройств. Такой эффект носит название «короткая циркуляция воздуха». В рабочей зоне помещения формируются застойные зоны, представляющие собой острова с повышенными температурами и концентрациями вредных веществ.

При вытесняющей вентиляции подача воздуха осуществляется в рабочую зону помещения, вытяжка производится из верхней части помещения. Под воздействием внутренних избытков теплоты формируется восходящий конвективный поток воздуха, создающий стратификацию температуры и загрязняющих веществ по высоте помещения. Эффективность вытесняющей вентиляции с точки зрения риска распространения вирусов зависит от месторасположения инфицированного человека относительно других людей, находящихся в помещении. Вероятность заражения при применении вытесняющей вентиляции ниже, чем при смешанной, когда люди сидят неподвижно и держатся на расстоянии (более 1,5 м в случае COVID-19), в то время как при их близком расположении друг к другу отмечается обратная зависимость [54].

Наибольшую эффективность показали сложные схемы, использующие несколько вариантов раздачи воздуха: например, смешанное воздухораспределение совместно с персонализированными системами вентиляции [53]. Персонализированная подача приточного воздуха непосредственно в зону дыхания человека позволяет снизить риск перекрёстного заражения до 50% [53, 55].

ОБСУЖДЕНИЕ

Большинство рассмотренных публикаций отмечают значительное влияние эффективности работы систем вентиляции на риск распространения вирусных респираторных заболеваний. Стоит отметить недостаточность проведённых исследований по динамике жизнеспособности аэрозолей вирусных инфекций при различных уровнях загрязнения воздушной среды. В рассмотренной выборке научных исследований не выявлен диапазон рекомендуемой подвижности воздуха для снижения возможности заражения. Рекомендуется проведение более развёрнутых исследований по применению местных увлажнителей воздуха и их влиянию на жизнеспособность респираторных вирусов. Выявлены несоответствия международных и отечественных нормативно-технических требований по обеспечению комфортных параметров микроклимата и качества воздушной среды в помещениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существуют убедительные и достаточные доказательства аэрозольной передачи вирусных респираторных инфекций, что приводит к острой необходимости междисциплинарных исследований по влиянию параметров микроклимата и условий работы инженерных систем на риск распространения заболеваний.

На основе проведённых теоретических исследований составлен перечень практических рекомендаций для снижения вероятности вспышек заболеваний в общественных и жилых зданиях.

1. Необходимо поддерживать оптимальные параметры относительной влажности воздуха в помещениях в пределах 40–60%. Локальные увлажнители воздуха барабанного типа позволяют снизить инфекционную нагрузку в помещениях, при правильной эксплуатации очищая воздух от мелкодисперсных частиц и обеспечивая низкую жизнеспособность вирусных патогенов.

2. Рекомендованная кратность воздухообмена, приходящаяся на одного человека, составляет не менее 30 м³/ч.

3. В переходный и холодный периоды года, являющиеся наиболее опасными с точки зрения распространения респираторных заболеваний, необходимо усиливать контроль за эффективностью работы вентиляционных систем (проверка работоспособности и проектных условий функционирования), очисткой и дезинфекцией воздуховодной сети и оборудования, обеспечивать своевременную замену фильтров.

4. Применение персонализированных систем вентиляции позволяет снизить риск передачи вирусных аэрозолей.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Д.В. Абрамкина — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; В. Верма — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, подготовка и написание текста статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. D.V. Abramkina — literature review, collection and analysis of literary sources, writing the text and editing the article; V. Verma — literature review, collection and analysis of literary sources, preparation and writing of the text of the article. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors confirm the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Vetrova EN, Chernyshova AI, Pritchina TN, et al. Monitoring of respiratory viral infections in Moscow during 2011–2022. *JMEI*. 2023;100(5):328–337. doi: 10.36233/0372-9311-376 EDN: TIEIOC
- Moreno T, Gibbons W. Aerosol transmission of human pathogens: From miasmata to modern viral pandemics and their preservation potential in the Anthropocene record. *Geosci Front*. 2022;13(6):101282. doi: 10.1016/j.gsf.2021.101282
- World Health Organization Europe. *Global report on infection prevention and control*. Geneva, Switzerland; 2022. 182 p.
- Krieger EA, Grijbovski AM, Samodova OV, Eriksen HM. Healthcare-associated infections in Northern Russia: Results of ten point-prevalence surveys in 2006–2010. *Medicina*. 2015;51(3):193–199. doi: 10.1016/j.medici.2015.05.002
- Rong R, Lin L, Yang Y, et al. Trending prevalence of healthcare-associated infections in a tertiary hospital in China during the COVID-19 pandemic. *BMC Infectious Diseases*. 2023;23(1):41. doi: 10.1186/s12879-022-07952-9
- Yamaguto GE, Zhen F, Moreira MM, et al. Community respiratory viruses and healthcare-associated infections: epidemiological and clinical aspects. *J Hosp Infect*. 2022;12:187–193. doi: 10.1016/j.jhin.2022.01.009
- Seto WH. Airborne transmission and precautions: facts and myths. *J Hosp Infect*. 2015;89(4):225–228. doi: 10.1016/j.jhin.2014.11.005
- Morawska L. Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Indoor Air*. 2006;16(5):335–347. doi: 10.1111/j.1600-0668.2006.00432.x
- Huang J, Jones P, Zhang A, et al. Outdoor airborne transmission of coronavirus among apartments in high-density cities. *Frontiers in Built Environment*. 2021;7:666923. doi: 10.3389/fbuil.2021.666923
- Kwon KS, Park JI, Park YJ, et al. Evidence of long-distance droplet transmission of SARS-CoV-2 by direct air flow in a restaurant in Korea. *J Korean Med Sci*. 2020;35(46):e415. doi: 10.3346/jkms.2020.35.e415
- Jiang G, Wang C, Song L, et al. Aerosol transmission, an indispensable route of COVID-19 spread: case study of a department-store cluster. *Front Environ Sci Eng*. 2021;15(3):46. doi: 10.1007/s11783-021-1386-6
- Jang S, Han S, Rhee J. Cluster of coronavirus disease associated with fitness dance classes, South Korea. *Emerg Infect Dis*. 2020;26(8):1917–1920. doi: 10.3201/eid2608.200633
- Shen Y, Li C, Dong, H, et al. Community outbreak investigation of SARS-CoV-2 transmission among bus riders in eastern China. *JAMA Intern Med*. 2020;180(12):1665–1671. doi: 10.1001/jamainternmed.2020.5225
- Tellier R. COVID-19: the case for aerosol transmission. *Interface Focus*. 2022;12(2):20210072. doi: 10.1098/rsfs.2021.0072
- Milton DK. A rosetta stone for understanding infectious drops and aerosols. *J Pediatric Infect Dis Soc*. 2020;9(4):413–415. doi: 10.1093/jpids/piaa079
- Prather KA, Marr LC, Schooley RT, et al. Airborne transmission of SARS-CoV-2. *Science*. 2020;370(6514):303–304. doi: 10.1126/science.abf0521
- Chong KL, Ng CS, Hori N, et al. Extended lifetime of respiratory droplets in a turbulent vapor puff and its implications on airborne disease transmission. *Phys Rev Lett*. 2021;126(3):034502. doi: 10.1103/PhysRevLett.126.034502
- Tang JW, Bahnfleth WP, Bluyssen PM, et al. Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2). *J Hosp Infect*. 2021;110:89–96. doi: 10.1016/j.jhin.2020.12.022
- Raina SK, Kumar R, Bhota S, et al. Does temperature and humidity influence the spread of COVID-19? A preliminary report. *J Family Med Prim Care*. 2020;9(4):1811–1814. doi: 10.4103/jfmpc.jfmpc_494_20
- Paynter S. Humidity and respiratory virus transmission in tropical and temperate settings. *Epidemiol Infect*. 2015;143(6):1110–1118. doi: 10.1017/S0950268814002702
- Longest AK, Rockey NC, Lakdawala SS, Marr LC. Review of factors affecting virus inactivation in aerosols and drop-lets. *J R Soc Interface*. 2024;21(215):18. doi: 10.1098/rsif.2024.0018
- Zhan S, Lin Z. Dilution-based evaluation of airborne infection risk — thorough expansion of Wells-Riley model. *Build Environ*. 2021;194:107674. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107674
- Dbouk T, Drikakis D. On coughing and airborne droplet transmission to humans. *Phys Fluids*. 2020;32(5):053310. doi: 10.1063/5.0011960
- Rezaei M, Netz RR. Airborne virus transmission via respiratory droplets: Effects of droplet evaporation and sedimentation. *Curr Opin Colloid Interface Sci*. 2021;55:101471. doi: 10.1016/j.cocis.2021.101471
- Yang W, Elankumaran S, Marr LC. Relationship between humidity and influenza A viability in droplets and implications for influenza's seasonality. *PLoS One*. 2012;7(10):e46789. doi: 10.1371/journal.pone.0046789
- Kormuth KA, Lin K, Qian Z, et al. Environmental persistence of influenza viruses is dependent upon virus type and host origin. *mSphere*. 2019;4(4):e00552–19. doi: 10.1128/mSphere.00552-19
- Geng Y, Wang Y. Stability and transmissibility of SARS-CoV-2 in the environment. *J Med Virol*. 2023;95(1):e28103. doi: 10.1002/jmv.28103
- Moriyama M, Hugentobler WJ, Iwasaki A. Seasonality of respiratory viral infections. *Annu Rev Virol*. 2020;7(1):83–101. doi: 10.1146/annurev-virology-012420-022445
- Wolkoff P. Indoor air humidity revisited: Impact on acute symptoms, work productivity, and risk of influenza and COVID-19 infection. *Int J Hyg Environ Health*. 2024;256:114313. doi: 10.1016/j.ijheh.2023.114313
- Sze To GN, Wan MP, Chao CYH, et al. Experimental study of dispersion and deposition of expiratory aerosols in aircraft cabins and impact on infectious disease transmission. *Aerosol Science and Technology*. 2009;43(5):466–485. doi: 10.1080/02786820902736658
- Coccia M. Factors determining the diffusion of COVID-19 and suggested strategy to prevent future accelerated viral infectivity similar to COVID. *Sci Total Environ*. 2020;729:138474. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138474
- Wu X, Nethery RC, Sabath MB, et al. Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis. *Sci Adv*. 2020;6(45):eabd4049. doi: 10.1126/sciadv.abd4049

33. Nor NSM, Yip CW, Ibrahim N, et al. Particulate matter (PM_{2.5}) as a potential SARS-CoV-2 carrier. *Sci Rep.* 2021;11(1):2508. doi: 10.1038/s41598-021-81935-9
34. Ciglenečki I, Orlović-Leko P, Vidović K, Tasić V. The possible role of the surface active substances (SAS) in the airborne transmission of SARS-CoV-2. *Environ Res.* 2021;198:111215. doi: 10.1016/j.envres.2021.111215
35. Guo M, Xu P, Xiao T, et al. Review and comparison of HVAC operation guidelines in different countries during the COVID-19 pandemic. *Build Environ.* 2021;187:107368. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107368
36. Amoatey P, Omidvarborna H, Baawain MS, Al-Mamun A. Impact of building ventilation systems and habitual indoor incense burning on SARS-CoV-2 virus transmissions in Middle Eastern countries. *Sci Total Environ.* 2020;733:139356. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139356
37. Bhagat RK, Davies Wykes MS, Dalziel SB, Linden PF. Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19. *J Fluid Mech.* 2020;903:F1. doi: 10.1017/jfm.2020.720
38. Melikov AK. COVID-19: Reduction of airborne transmission needs paradigm shift in ventilation. *Building and Environment.* 2020;186:107336. doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107336
39. Nejatian A, Sadabad FE, Shirazi FM, et al. How much natural ventilation rate can suppress COVID-19 transmission in occupancy zones? *J Res Med Sci.* 2024;28:84. doi: 10.4103/jrms.jrms_796_22
40. Pavlov MV, Karpov DF, Vafaeva KM, et al. Non-destructive thermal monitoring of temperature and flow rate of the heat carrier in a heating device. *E3S Web of Conferences.* 2024;581:01049. doi: 10.1051/e3sconf/202458101049
41. Liu Z, Liu H, Yin H, et al. Prevention of surgical site infection under different ventilation systems in operating room environment. *Front Environ Sci Eng.* 2021;15(3):36. doi: 10.1007/s11783-020-1327-9
42. Li T, Zhang X, Li C, et al. Onset of respiratory symptoms among Chinese students: associations with dampness and redecoration, PM₁₀, NO₂, SO₂ and inadequate ventilation in the school. *J Asthma.* 2020;57(5):495–504. doi: 10.1080/02770903.2019.1590591
43. Abramkina D, Ivanova A. Local air humidifiers in museums. In: Murgul V., Pasetti M., editors. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018. EMMFT-2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. Publisher: Springer, Cham; 2018;982:78–83. doi: 10.1007/978-3-030-19756-8_8
44. Yu ITS, Li Y, Wong TW, et al. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus. *N Engl J Med.* 2004;350(17):1731–1739. doi: 10.1056/NEJMoa032867
45. Santarpia JL, Rivera DN, Herrera VL, et al. Aerosol and surface contamination of SARS-CoV-2 observed in quarantine and isolation care. *Sci Rep.* 2020;10(1):12732. doi: 10.1038/s41598-020-69286-3
46. Ong SWX, Tan YK, Chia PY, et al. Air, Surface environmental, and personal protective equipment contamination by severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) from a symptomatic patient. *JAMA.* 2020;323(16):1610–1612. doi: 10.1001/jama.2020.3227
47. Azuma K, Yanagi U, Kagi N, et al. Environmental factors involved in SARS-CoV-2 transmission: effect and role of indoor environmental quality in the strategy for COVID-19 infection control. *Environ Health Prev Med.* 2020;25(1):66. doi: 10.1186/s12199-020-00904-2
48. van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH, et al. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *N Engl J Med.* 2020;382(16):1564–1567. doi: 10.1056/NEJMc2004973
49. Birgand G, Peiffer-Smadja N, Fournier S, et al. Assessment of air contamination by SARS-CoV-2 in hospital settings. *JAMA Netw Open.* 2020;3(12):e2033232. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2020.33232
50. Dancer SJ, Li Y, Hart A, et al. What is the risk of acquiring SARS-CoV-2 from the use of public toilets? *Sci Total Environ.* 2021;792:148341. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148341
51. Birmili W, Selinka HC, Moriske HJ, et al. Ventilation concepts in schools for the pre-vention of transmission of highly infectious viruses (SARS-CoV-2) by aerosols in indoor air. *Bundesgesundheitsblatt Gesund-heitsforschung Gesundheitsschutz.* 2021;64(12):1570–1580. doi: 10.1007/s00103-021-03452-4 (In Germ.)
52. Zhang S, Niu D, Lu Y, Lin Z. Contaminant removal and contaminant dispersion of air distribution for overall and local airborne infection risk controls. *Sci Total Environ.* 2022;833:155173. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155173
53. Su W, Yang B, Melikov A, et al. Infection probability under different air distribution patterns. *Building and Environment.* 2022;207 (Pt B):108555. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108555
54. Nielsen PV, Xu C. Multiple airflow patterns in human microenvironment and the influence on short-distance airborne cross-infection — A review. *Indoor and Built Environment.* 2021;31(5):1420326X2110485. doi: 10.1177/1420326X211048539
55. de Haas MMA, Loomans MGLC, te Kulve M, et al. Effectiveness of personalized ventilation in reducing airborne infection risk for long-term care facilities. *International Journal of Ventilation.* 2023;22(4):327–335. doi: 10.1080/14733315.2023.2198781

ОБ АВТОРАХ

***Абрамкина Дарья Викторовна**, канд. техн. наук, доцент;
адрес: Россия, 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26;
ORCID: 0000-0001-8635-1669;
eLibrary SPIN: 2376-9125;
e-mail: dabramkina@ya.ru

Верма Вишал, аспирант;
ORCID: 0009-0006-5290-9162;
e-mail: vishalverma2k16@gmail.com

*Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

***Darya V. Abramkina**, Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor;
address: 26 Yaroslavskoye hwy, Moscow, Russia, 129337;
ORCID: 0000-0001-8635-1669;
eLibrary SPIN: 2376-9125;
e-mail: dabramkina@ya.ru

Vishal Verma, Graduate Student;
ORCID: 0009-0006-5290-9162;
e-mail: vishalverma2k16@gmail.com