

МРНТИ 50.07.05; 27.35.14
УДК 533.9.01; 519.63; 519.684

<https://doi.org/10.51889/2022-1.1728-7901.15>

А.А. Исахов¹, П.Т. Омарова^{1*}, Ас.А. Исахов²

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Акционерное общество «Казахстанско-Британский технический университет»,
г. Алматы, Казахстан

*e-mail: omarova.peryzat2@gmail.com

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА СОЦИАЛЬНОГО ДИСТАНЦИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПЕРЕДАЧИ COVID-19 ВОЗДУШНЫМ ПУТЕМ

Аннотация

Распространение опасного инфекционного заболевания COVID-19 показывает, что бессимптомные носители могут непреднамеренно передавать вирус через воздушный поток. Многие инфекционные болезни могут инфицировать человека крошечными капельками или частицами, которые несут различные вирусы и бактерии, генерирующиеся респираторной системой зараженных пациентов. В этой статье представлены численные результаты распространения частиц в помещении. Предлагаемая численная модель в данной работе учитывает осаждение частиц или капель под действием гравитационного осаждения и перенос в помещении в процессе дыхания, чиханья или кашля. Численно исследуются три различных случая с учетом нормального дыхания, кашля и чиханья, соответственно имеющее три различные скорости выброса частиц изо рта. Уравнения Навье – Стокса для несжимаемых потоков использовались для описания трехмерных потоков воздуха внутри вентилируемых помещений. Влияние скорости вентиляции на социальное дистанцирование, также исследуется с помощью вычислений. Было обнаружено, что частицы могут перемещаться на расстояние до 5 м с уменьшением концентрации в направлении воздушного потока. Подводя итоги, с учетом условий окружающей среды двухметровое социальное расстояние, рекомендованное ВОЗ, является недостаточным.

Ключевые слова: Covid-19, Навье-Стокса, численная модель, вирус.

Аңдатпа

А.А. Исахов¹, П.Т. Омарова¹, Ас.А. Исахов²

¹ал-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ, Қазақстан

²Акционерлік Қоғам «Қазақстан-Британ техникалық университеті», Алматы қ, Қазақстан

COVID-19-ДЫҢ АУАДА ТАРАЛУЫН АЛДЫН АЛУ ҮШІН ӘЛЕУМЕТТІК АРАҚАШЫҚТЫҚТЫ САНДЫҚ БАҒАЛАУ

Covid-19 қауіпті жұқпалы ауруының таралуы симптомсыз тасымалдаушылар арқылы ауа ағынымен берілуі мүмкін екенін көрсетеді. Көптеген жұқпалы аурулар адамға әртүрлі вирустар мен бактерияларды тасымалдайтын, жұқтырған науқастардың тыныс алу жүйесін тудыратын ұсақ тамшылармен немесе бөлшектермен жұқтыруы мүмкін. Бұл мақалада бөлмедегі бөлшектердің таралуының сандық нәтижелері келтірілген. Бұл жұмыста ұсынылған сандық модель дем алу, түшкіру немесе жөтелу кезінде бөлмеде гравитациялық шөгу мен тасымалдау әсерінен бөлшектердің немесе тамшылардың шөгуін ескереді. Қалыпты тыныс алу мен жөтелді, түшкіруді ескере отырып, үш түрлі жағдай сандық түрде зерттеледі, ал бөлшектердің аузынан шығарылуының үш түрлі жылдамдығы қарастырылады. Сығылмайтын ағындарға арналған Навье-Стокс теңдеулері желдетілетін бөлмелердің ішіндегі үш өлшемді ауа ағындарын сипаттау үшін қолданылды. Желдету жылдамдығының әлеуметтік арақашықтыққа әсері де есептеулер арқылы зерттеледі. Бөлшектер ауа ағыны бағытында концентрацияның төмендеуімен 5 м дейін жылжи алатыны анықталды. Қорыта айтқанда, экологиялық жағдайды ескере отырып, ДДҰ ұсынған екі метрлік әлеуметтік қашықтық жеткіліксіз.

Түйін сөздер: Covid-19, Навье-Стокс, сандық модель, вирус.

Abstract

A NUMERICAL ASSESSMENT OF SOCIAL DISTANCING OF PREVENTING AIRBORNE TRANSMISSION OF COVID-19

Issakhov A.A.¹, Omarova P.T.¹, Issakhov As.A.²

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²Joint Stock Company «Kazakh-British Technical University», Almaty, Kazakhstan

The spread of the dangerous infectious disease COVID-19 shows that asymptomatic carriers can inadvertently transmit the virus through the airstream. Many infectious diseases can infect a person with tiny droplets or particles that carry various viruses and bacteria, generating infected patients' respiratory system. This article presents the numerical results of particle propagation in a room. The proposed numerical model in this paper takes into account the settling of particles or droplets under the action of gravitational force and transport in the room during breathing, sneezing or coughing. Three different cases are numerically investigated, taking into account normal breathing, coughing and sneezing, respectively, having three different particle emission rates from the mouth. The Navier–Stokes equations for incompressible flows have been used to describe three-dimensional air flows inside ventilated spaces. The effect of ventilation rate on social distancing is also being investigated through computation. It has been found that the particles can travel up to 5 m with decreasing concentration in the direction of the air flow. To sum up, given the environmental conditions, the two-meter social distance recommended by the WHO is insufficient.

Keywords: Covid-19, Navier-Stokes, numerical model, virus.

Введение

С конца 2019 года и до сегодняшнего дня весь мир ведут борьбу с масштабным вирусом SARS-CoV-2, вызывающим опасное инфекционное заболевание – COVID-19 [1]. Наиболее частые симптомы заболевания – лихорадка, утомляемость и сухой кашель. Учитывая быстрое распространение и летальный исход вируса, к началу 2020 года инфекция была признана пандемией и остановила экономическое развитие во многих странах мира [2, 3].

Подавляющая часть респираторных заболеваний, таких как туберкулез, корь, ветряная оспа [4,5], грипп, бронхит и легочная чума [6,7], передаются воздушно-капельным путем. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [8], SARS-CoV-2 также распространяется воздушно-капельным путем (частицами) или при тесном контакте. Основные механизмы распространения вирусных заболеваний - это кашель и чихание. При активном дыхании, чихании и кашле образуются маленькие капельки, которые состоят из воды, воздуха, мелких частиц ($dp < 10^{-6}$ м) и дыхательной жидкости. Эти компоненты рефлекторных процессов человека имеют разную скорость и продолжительность (время) генерации и, соответственно, приводят к разному воздействию на окружающую среду и организм человека. Расстояние, которое могут пройти эти капли, напрямую зависит от размера самих капель и скорости их распространения.

Механизм образования и происхождения капель с вирионом связан с вирусной и бактериальной нагрузкой в микрокаплях, поскольку патогены обычно ограничены определенными частями тела [9]. Чтобы лучше понять процесс образования и распространения вирусов, необходимо их детальное моделирование в искусственной среде. Ряд исследований показывает, что безусловные рефлексы человека (кашель и чихание) состоят не только из слизисто-слюнных капель, но в основном из многофазного турбулентного газа, слоистого облака, которое захватывает окружающий воздух и разносит в нем капли с микроорганизмами [10, 11, 12].

Многие инфекционные заболевания передаются от человека к человеку при вдыхании капель, переносимых по воздуху, которые переносят различные вирусы и бактерии, генерируемые респираторной системой инфицированных людей. Люди в комнате могут легко заразиться вирусом, который переносится каплями или частицами, потому что скорость воздухообмена в комнате ограничена. При нормальном дыхании, чихании или кашле образуются крошечные капли воды и воздуха или мелкие частицы. Эти методы генерации имеют разную скорость и продолжительность генерации, что приводит к разному воздействию на окружающую среду в помещении и человеческий организм.

Основная цель этой работы – изучить перенос капель или частиц, генерируемых дыхательной системой, в помещении при различных сценариях. Поскольку экспериментально изучить перенос и распространение капель или частиц из дыхательной системы сложно, в этой работе численно исследуется распространение капель воздуха, чихание и кашель в помещении. Капли воздуха считаются небольшими частицами воды.

Математическая модель

Для реализации математической модели воздушного потока используется система уравнений Навье-Стокса. Уравнения Навье-Стокса для случаев несжимаемой жидкости используются для моделирования поля течения. Уравнения неразрывности и импульса, используемые в модели, определяются следующим образом, которая была описана в работе [13]:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

где u_j - скорость потока воздуха, здесь $i, j = 1, 2, 3$, t - время, x_j - пространственные координаты, μ_{eff} - эффективная вязкость, p - давление (Па), $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ куда μ_t - турбулентная вязкость. Рассматриваемая внешняя сила тела - это сила тяжести, $f = \rho g$, где g ускорение свободного падения (m/s^2), ρ - плотность (kg/m^3).

Кинематическая зависимость между положением частиц (дыхательная капля) и скоростью частиц (дыхательная капля) равна

$$\frac{\partial x_p}{\partial t} = u_p \quad (3)$$

$$m_p \frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D + F_G \quad (4)$$

где, x_p - расположение частиц (m), F_G - сила тяжести, F_D - сила сопротивления, u_p - скорость частиц (m/s), u_f - скорость жидкости (m/s), m_p - масса частиц (kg), F_D - рассчитывается следующим образом

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_f \frac{\pi d_p^2}{4} C_D (u_f - u_p) |u_f - u_p|, \quad (5)$$

где, коэффициент сопротивления

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re}; & (Re < 1) \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}); & (1 \leq Re \leq 1000) \end{cases} \quad (6)$$

здесь ρ_f - плотность жидкости (kg/m^3), ρ_p - плотность частиц (kg/m^3) и d_p диаметр частицы

$$(m), \text{ Re} \equiv \frac{\rho d_p |\vec{u} - \vec{u}_p|}{\mu} \text{ число Рейнольдса.}$$

Для замыкания системы уравнений использовались различные турбулентные модели (k-ε, SST k-ω (shear stress transport), модель DES (Detached eddy simulation)). Эти турбулентные модели подробно описаны в статьях [14]. Все симуляции были выполнены с использованием турбулентной модели SST k-ω, поскольку эта модель оказалась надежной при моделировании воздушного потока в помещении [14, 15].

Эти уравнения дискретизируются с использованием метода конечных объемов. Для численного решения системы используется численный алгоритм SIMPLE (полуявный метод для уравнений давления) [14, 16]. Этот метод используется во многих работах для решения различных задач гидродинамики и теплообмена и послужил созданию целого класса численных методов. Все переменные и константы, которые использовались в этих расчетах, полностью физические.

Численное моделирование

В текущем исследовании были изучены различные скорости для распространения частицы ($d_p < 10^{-6}$ м) при кашле в комнате, подвергшихся загрязнению полномасштабную комнату. Для данного исследования была взята полномасштабная комната с размерами $X \times Y \times Z = 8 \times 3 \times 3$ м, которая используется в качестве внутренней среды для текущего моделирования. Высота человека находящегося внутри помещения составляет 1.8 м и соответственно высота рта загрязняющего человека от пола составляет около 1.65 м. Полномасштабная комната вентилируется с помощью одной решетки на боковой стене, размер решетки составляет 0.5×0.125 м, а вытяжка такого же размера расположена внизу той же стены. Вход и выход симметричны относительно средней линии в плоскости XY (по X -1.5 м). И в комнате один человек находится на противоположной стороне входа и выхода. При кашле (чихании) человека в помещении выделяются частицы (респираторные капли) различного размера (рис. 1-3). Было смоделировано несколько сценариев, чтобы полностью изучить влияние частиц разного размера, скорости частиц и вентиляции. Для данной задачи рассматривали несколько случаев.

В данной задаче применили граничное условие постоянной скорости на входе для рта, вентиляция комнаты загрязняющего человека с интенсивностью турбулентности 20% в указанном направлении. Вентиляция в комнате создает воздушный поток со скоростью, установленной как 0.5 м/сек и 1 м/сек. Граничные условия для тела человека, боковых стен вычислительной области и области пола были заданы как твердая стена. Для человеческого рта и входной вентиляции граничные условия задаются как вход, а для выходной вентиляции задается как выход.

Размер вычислительной сетки постепенно уменьшается, относительно тела человека, входная и выходная вентиляция. Поскольку точность результатов сильно зависит от размера сетки, используется сгущенная сетка возле головы, особенно вокруг рта. Этот метод помогает сократить вычислительные затраты за счет уменьшения общего количества ячеек для данной сложной геометрии. На рисунках 1-3 представлен один момент времени для разной скорости кашля. Как видно из полученных результатов, что различные режимы скорости очень сильно влияют на расстояние потока в закрытом помещении. Как и ожидалось, увеличение скорости приводит к увеличению потока. На рисунке 3 видно за 30 сек поток, выброшенный из рта, может преодолеть расстояние 4 м. Однако это не указывает на то, что частицы также могут переноситься на 4 м, поскольку на частицы также действуют силы трения и гравитация.

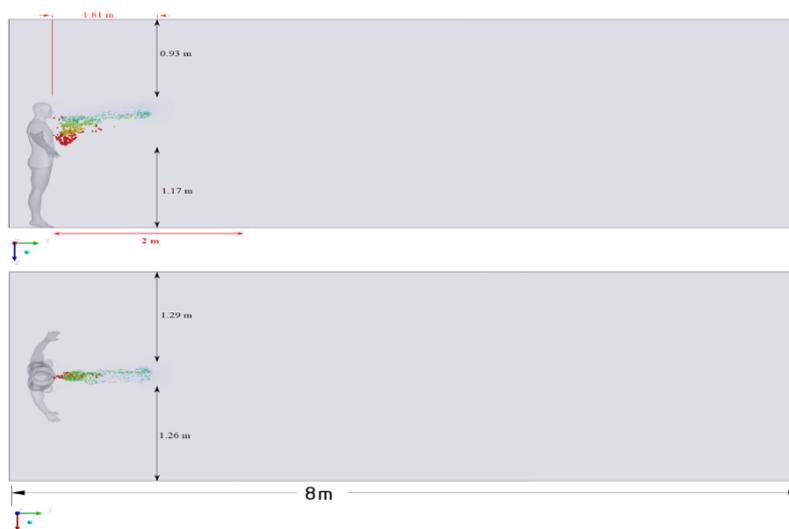


Рисунок 1. Распределение частиц при кашле = 1 м/с без вентиляции

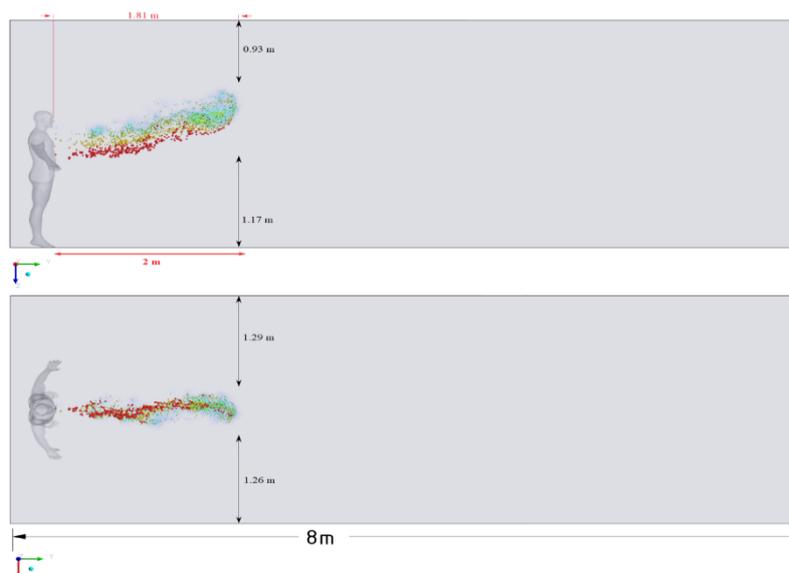


Рисунок 2. Распределение частиц при кашле = 6 м/с без вентиляции

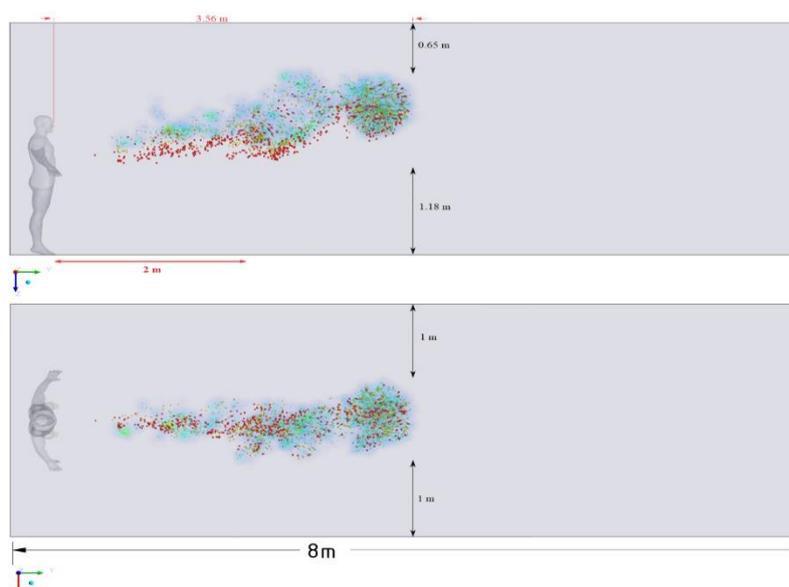


Рисунок 3. Распределение частиц при кашле = 20 м/с без вентиляции

Результаты, представленные на рисунке 4а, показывают, как частицы распространяются в помещении без вентиляции. Различные режимы выброса частиц оказывают значительное влияние на перенос частиц по длине. В режиме выброса частиц со скоростью 20 м/сек частицы за 30 сек могут преодолеть расстояние в 3.5 раза больше, чем при выбросе со скоростью 1 м/сек и расстояние в 2 раза больше, чем при выбросе 6 м/сек. А на рисунке 4б, при использовании вентиляции в помещении со скоростью 0.5 м/сек увеличивается не только расстояние по длине, но и расстояние по высоте. Стоит отметить сильное увеличение площади распространения частиц в сценарии 3 из-за увеличения скорости выброса и вентиляции. На рисунке 4с показали нелинейное распространение частиц в помещении, так как наблюдается резкое увеличение высоты.

Это резкое увеличение происходит из-за вихрей, возникающих в верхней части комнаты при вентиляции со скоростью 1 м/сек. Как и ожидалось, увеличение скорости выброса частиц увеличивало транспортное расстояние по длине и высоте. Однако следует отметить, что при вентиляции со скоростью 1 м/сек осаждение частиц за 40 сек уменьшается с увеличением скорости выброса. Это явление можно объяснить преобладанием импульса над силой тяжести.

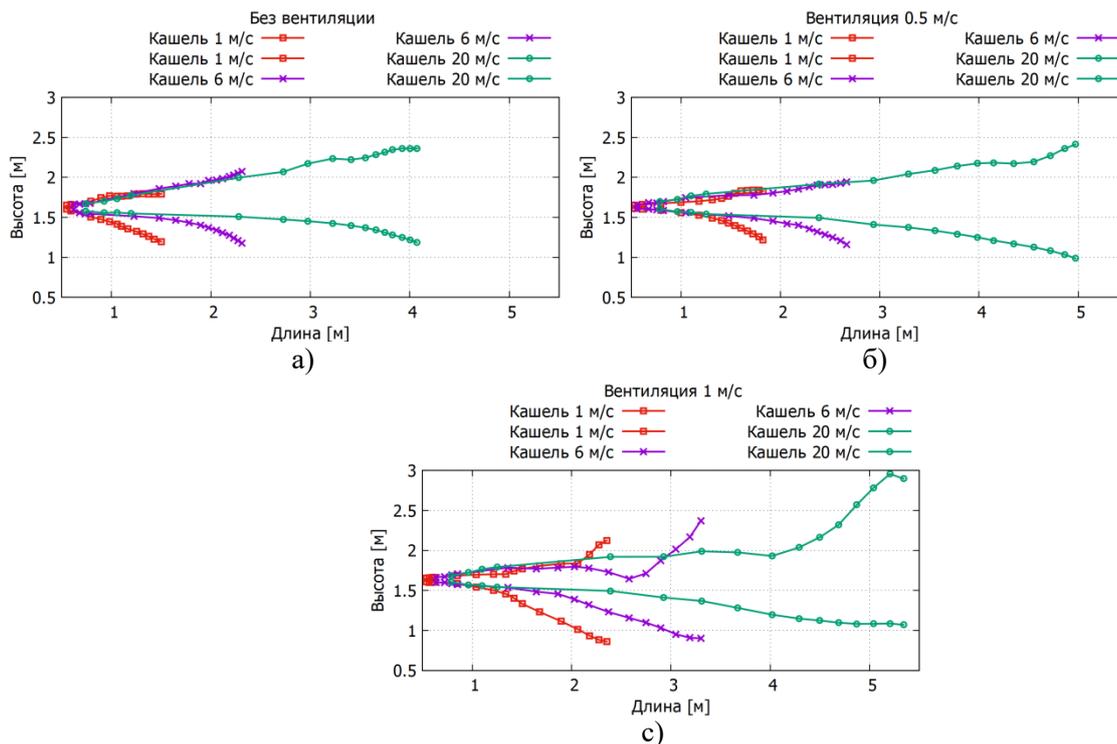


Рисунок 4. Диапазон распространения частиц

Заклучение

В данной работе были использованы CFD (Computational fluid dynamics) для исследования переноса и рассеивания частиц различных размеров, которые происходят, когда человек дышит, чихает или кашляет. Процесс выброса частиц в воздух был использован для имитации настоящего человеческого кашля. Были проведены обширные компьютерные исследования выбросов частиц при нормальном дыхании, чихании и кашле человека.

Подтверждение модели вентиляции хорошо согласуется с экспериментальными данными, что означает, что весь механизм может быть эффективно смоделирован.

Как видно из полученных результатов, при чихании или кашле со скоростью 20 м/сек частицы или капли перемещаются более чем на 3 м за 40 сек. Анализ распространения чихания показал, что зона максимального воздействия составляет 4.84 м ниже по течению, 1.13 м в поперечном направлении и 1.82 м по горизонтали. Из-за сложных реальных условий вентиляции окружающей среды необходимо учитывать социальное расстояние более 2 м, т.е. более 5 м. Важно отметить, что в режиме выброса частиц со скоростью 20 м/сек частицы за 30 сек преодолевают расстояние 3 м. В 5 раз больше, чем при выбросе со скоростью 1 м/сек и на расстояние в 2 раза больше, чем при выбросе 6 м/сек. Рекомендованная ВОЗ социальная дистанция в 2 м выполняется для простого дыхания во всех случаях (без вентиляции и с вентиляцией). Однако при кашле или чихании этого расстояния явно недостаточно и необходимо социальное расстояние не менее 5 м, чтобы не попасть в зону воздействия этих частиц.

Все результаты при высоких скоростях выброса переносят частицы на гораздо большее расстояние из-за большого количества движения. Для того чтобы, снизить передачу заболеваний от человека к человеку, очень важно личные привычки, такие как прикрытие носа и рта при чихании или кашле или ношение масок. Следует отметить, что приведенные выше результаты основаны на упрощенных и идеальных сценариях без учета многих влияющих факторов, таких как температура, влажность, испарение капель и частиц и т.д. Поэтому результаты следует использовать с осторожностью. Однако это исследование можно рассматривать как направление в понимании сложных явлений переноса частиц разного размера в помещениях и, в конечном итоге, в предотвращении передачи инфекционных заболеваний.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан (AP09259783).

References:

1. Lamb L. E., Bartolone S. N., Ward E., Chancellor M. B. Rapid detection of novel coronavirus (COVID-19) by reverse transcription-loop-mediated isothermal amplification // *MedRxiv* 3. – 2020. – P. 877. <https://doi.org/10.1101/2020.02.19.20025155>.
2. CDC. Social Distancing, Quarantine, and Isolation (Centers for Disease Control and Prevention. 2020).
3. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public> /Accessed 2 November 2020.
4. Leclair J. M., Zaia J. A., Levin M. J., Congdon R. G., Goldmann D. A. Airborne transmission of chickenpox in a hospital // *N. Engl. J. Med.* 302. – 1980. – P. 450–453. <https://doi.org/10.1056/NEJM198002213020807> (1980).
5. Escombe A. R. et al. The detection of airborne transmission of tuberculosis from HIV-infected patients, using an in vivo air sampling model // *Clin. Infect. Dis.* 44. – 2007. –P.1349–1357. <https://doi.org/10.1086/515397>.
6. Roy C. J., Milton D. K. Airborne Transmission of Communicable Infection — The Elusive Pathway // *New England Journal of Medicine.* – 2004. – № 350(17). – P. 1710–1712. doi:10.1056/nejmp048051
7. Frankova V. Inhalatory infection of mice with influenza A0/PR8 virus. I. The site of primary virus replication and its spread in the respiratory tract // *Acta Virol.* – 1975. № 19(1). P. 35–40.
8. Busco G., Yang S. R., Seo J., Hassan Y. A. Sneezing and asymptomatic virus transmission // *Physics of Fluids.* – 2020. – № 32(7). – 073309. doi:10.1063/5.0019090
9. Morawska, L. Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? // *Indoor Air.* – 2006. – № 16(5). – P. 335–347. doi:10.1111/j.1600-0668.2006.00432.x
10. Bourouiba L., Dehandschoewercker E., Bush J. W. M. The fluid dynamics of coughing and sneezing // In: *Refereed Proceedings of the International Society of Indoor Air Quality and Climate 10th Healthy Buildings Conference Brisbane.* – AU (2012).
11. Bourouiba L., Dehandschoewercker E., Bush, J. W. M. Violent expiratory events: on coughing and sneezing // *Journal of Fluid Mechanics.* – 2014. – № 745. – P. 537–563. doi:10.1017/jfm.2014.88
12. Bourouiba L. A Sneeze // *New England Journal of Medicine.* – 2016. – № 375(8). – P. e15. doi:10.1056/nejmicm1501197
13. Zhao B., Zhang Z., Li X. Numerical study of the transport of droplets or particles generated by respiratory system indoors // *Building and Environment.* – 2005. – № 40(8). – P. 1032–1039. doi:10.1016/j.buildenv.2004.09.01
14. Spalart P. R., Jou W.-H., Strelets M., Allmaras S. R. Comments on the feasibility of LES for wings and on the hybrid RANS/LES approach, advances in DNS/LES // In *Proc. First AFOSR International Conference on DNS/LES.* – 1997.
15. Zhang T., Lee K., Chen Q. A simplified approach to describe complex diffusers in displacement ventilation for CFD simulations // *Indoor Air.* – 2009. – № 19. – P. 255–267.
16. Han M., Ooka R., Kikumoto H. Lattice Boltzmann method-based large-eddy simulation of indoor isothermal airflow // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2019. № 130. P. 700–709. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer