

УДК 004.023: 004.519.85

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.33.2.003](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.33.2.003)

Компьютерная модель воздушно-капельного распространения SARS-COV-2 в воздухе

С.В. Веретехина, В.И. Зайковский

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный социальный университет»,
Москва, Российская Федерация*

Резюме. Передача вирусного заболевания COVID обусловлена распространением выдыхаемого инфицированным человеком воздуха, содержащего вирус. Моделирование распространения вирусного облака дает возможность оценить условия ограничения его распространения. Для визуализации динамической картины распространения вирусного облака применяется математическое и компьютерное моделирование. В работе представлены результаты компьютерного моделирования распространения вируса SARS-COV-2 в воздухе в виде аэрозоля из частиц слюны <5 мкм, содержащих вирус, образующихся при дыхании инфицированного человека. Приведены сравнительные размеры частиц аэрозоля выдыхаемой воздушно-капельной смеси и частиц дыма, тумана в воздухе. Сделан вывод о термодинамическом конвекционном процессе распространения аэрозольного облака в воздухе. Компьютерная модель разработана на основе уравнения Лапласа с нулевыми граничными условиями и начальными условиями – мгновенный источник в центре объема. Проведено моделирование и сделаны выводы о влиянии температуры на затухание вспышки. Вынесены предположения о необходимости применения поглощающего материала для сокращения времени затухания вспышки. С теоретической и практической точек зрения определено, что процесс распространения SARS-COV-2 в воздухе обусловлен диффузией и конвекцией потока частиц воздушно-капельной смеси в воздухе. Такой поток аналогичен распространению в воздухе дыма и тумана. В исследовании показано, что распространение вируса в воздухе происходит по законам термодинамики и может быть описано средствами математического моделирования физических явлений конвекции и диффузии в газовой среде. Компьютерная модель распространения аэрозольного вирусного облака позволяет визуально оценить масштаб и скорость распространения вируса, выдыхаемого инфицированным человеком, при различных параметрах окружающей среды.

Ключевые слова: SARS-COV-2, компьютерное моделирование диффузии, воздушно-капельное распространение, вирус, конвективная диффузия.

Для цитирования: Веретехина С.В., Зайковский В.И. Компьютерная модель воздушно-капельного распространения SARS-COV-2 в воздухе. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(2). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=891> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.003

A software model of airborne propagation SARS-COV-2 in the air

S.V. Veretekhina, V.I. Zaikovskii

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian State Social University", Moscow, Russian Federation

Abstract: The danger of the spread of the COVID virus disease is due to the propagation of the exhaled virus cloud in the natural conditions of human habitation. Modeling the transmission of a viral cloud of airborne droplets makes it possible to assess the conditions for limiting its spread. Mathematical tools and software modeling tools are used to obtain a dynamic picture of the mongering of the virus cloud.

The results of software modeling of SARS-COV-2 virus spread in air aerosolized saliva particles <5 microns formed by an infected person breathing are presented. The comparative sizes of aerosol particles of the exhaled air-drop mixture and smoke particles in the air are given. A conclusion is made about the thermodynamic convection process of aerosol-cloud propagation in the air. The software model is developed based on the Laplace equation with zero boundary conditions and initial conditions – an instantaneous source in the center of the volume. The simulation is carried out and conclusions are drawn about the influence of temperature on flash attenuation. Assumptions are made about the need to use an absorbing material to reduce the flash attenuation time. From theoretical and practical points of view, it is determined that the process of SARS-COV-2 propagation in the air is caused by the diffusion and convection process of the air-drop mixture flow in the air. Such a flow is similar to the spread of smoke and fog in the air. The study takes into account physical phenomena such as diffusion and convection in the air.

Keywords: SARS-COV-2, software modeling of diffusion, airborne propagation, virus, convective diffusion, mathematical tools.

For citation: Veretekhina S.V., Zaykovskiy V.I. Software model of airborne propagation of SARS-COV-2 in the air. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(2). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=891> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.003 (In Russ).

Введение

В декабре 2019 года в Китае началась вспышка эпидемии, вызванная свежесобраным вирусом SARS-CoV-2. Вскоре она распространилась на другие страны, что поставило под угрозу безопасность здоровья людей во всем мире. Перед исследователями стоит задача профилактики эпидемий. Профилактика инфицирования вирусом COVID требует исследования путей передачи выдыхаемой больным человеком аэрозольной смеси, содержащей капельки влаги с вирусом, от человека к человеку, определения начальных и граничных условий возникновения и распространения зараженного облака. В исследовании проводится математическое и компьютерное моделирование движения вирусосодержащего аэрозольного облака в среде обитания человека. Известны различные способы распространения вируса в виде респираторных аэрозолей, образующихся из частиц слюны ротовой и носовой полостей человека при кашле, дыхании или во время разговора. Передача инфекции по воздуху может происходить двумя путями, в зависимости от размера вирусосодержащих частиц.

1. Контактный путь заражения: крупные частицы воздушно-капельной взвеси оседают вниз под действием силы тяжести на небольшом расстоянии (до 2 м) от источника и в течение некоторого времени (от часов до нескольких дней) остаются вирулентными;
2. Воздушно-капельный путь заражения: мелкие частицы в виде аэрозоли остаются в воздухе, разносятся на большее расстояние и испаряются со временем, в зависимости от влажности и температуры окружающей атмосферы.

При контактном пути распространения инфекции основной угрозой является попадание вируса на кожу, руки и предметы. Проведенные исследования показывают, что инфицирование контактным путем возможно в течение нескольких часов, в зависимости от типа поверхности и скорости высыхания капель. Второй путь инфицирования происходит через распространение вирусосодержащих аэрозолей в воздухе. Воздушно-капельный путь распространения содержащих вирус аэрозолей представляет угрозу, если частицы аэрозоля вдыхаются другими людьми. В данной работе рассмотрено инфицирование по второму пути и проведено моделирование распространения аэрозольного облака в воздухе в течение временного периода.

Задачей данного исследования является изучение возможности расчета и моделирования процесса передачи инфекции с помощью известных в математической физике моделей распространений примесей в воздухе. Физические явления конвекции и диффузии в газовой среде достаточно изучены, разработаны математические модели, описывающие данные явления. Аналогичную математическую модель необходимо разработать и для расчета процесса распространения вирусного аэрозоля в воздухе. Компьютерная программа, реализующая такую математическую модель, позволит визуально оценить распространение вируса в заданном объеме пространства в трехмерном режиме. Такая модель дает возможность оценить скорость и объем распространения аэрозольного облака при разных условиях окружающей среды и предусмотреть необходимые меры для ограничения опасности заражения.

Математическое и компьютерное моделирование распространения аэрозольного облака при заданных граничных условиях

Очень важным этапом перед проведением математического и компьютерного моделирования является определение данных для моделирования. Частицы слюны, выдыхаемые во время речи, различаются по размеру от 1 мкм до 100 мкм (1 мкм = 10^{-6} м). При кашле и чихании образуются частицы 50 мкм и больше, видимые невооруженным глазом. [1] Такие крупные частицы не задерживаются в воздухе, они оседают вниз под влиянием силы тяжести; самые мелкие частицы образуют аэрозоль и могут задерживаться в воздухе. При дыхании выделяются меньшие по размеру, но гораздо более многочисленные аэрозольные частицы, чем при разговоре. Частицы визуализируются в лазерном эксперименте, изучающем образование капель слюны в воздухе во время разговора. [2] Диаметры этих частиц находятся в микронном диапазоне. [3] Такие частицы слишком малы, чтобы осесть под действием своего веса, они рассеиваются в воздухе в результате процессов конвекции и диффузии.

Аэрозоли образуются каплями менее 5 мкм, остающимися в воздухе на длительное время (более 3 часов) и разносятся в процессе конвекции на большие дистанции (несколько метров). Их размер и вес настолько мал, что они могут несколько часов сохраняться в воздухе во взвешенном состоянии. По этой причине они представляют угрозу для тех, кто входит в помещение, где несколько часов назад находился инфицированный человек. Кроме того, воздушно-капельная взвесь инфекционных частиц может распространяться на большие расстояния благодаря циркуляции воздушных потоков.

Проводя анализ исследований зарубежных авторов в эксперименте с аэрозолями вируса NDV (ньюкаслской болезни цыплят) выявлено, что количественная оценка снижения титра вируса в воздухе происходит со временем. Утверждается, что сразу после распыления аэрозоля, содержащего штамм вируса, происходит снижение на $2-3 \log_{10} \text{EID}_{50}/\text{m}^3$ в воздухе за счет осаждения самых крупных аэрозольных частиц, содержащих вирус. Аэрозоль из более мелких частиц размером 1-7 мкм и через 55 минут после распыления все еще находился в воздухе. [4] Результаты исследования аэрозолей вируса SARS-COV-2 показывают, что экспериментально полученные аэрозоли, содержащие вирус, оставались инфекционными при анализе тканевых культур, со снижением вирулентности с 103.5 до $102.7 \text{TCID}_{50}/1$ литр воздуха в течение 3-х часового периода наблюдения. [5]

Исследования и практика подтверждают, что близкородственные вирусы способны переносить инфекцию воздушным путем. Так, на основе эпидемиологического анализа распространения инфекции подтвержден воздушный путь распространения SARS-COV-1 вируса атипичной пневмонии.[6] Для штамма ШТ SO2009(H1N1)IV

вируса гриппа А(Н1N1) свиного происхождения, являвшегося причиной вспышки гриппа в апреле 2009 г., продемонстрировано, что вирус способен сохраняться в аэрозоле, передаваться и инфицировать воздушным путем в экспериментальных условиях. [7]

Результаты изучения выживаемости SARS-COV-2 в аэрозолях показывают, что температура, солнечный свет и влажность являются значимыми факторами, влияющими на вирулентность SARS-COV-2 аэрозолей. Солнечный свет и температура оказывают большее влияние на распад вируса, чем влажность. Время, необходимое для 90% снижения инфекционного вируса, варьировалось от 4,8 мин до 2 часов. Эти результаты свидетельствуют о том, что время жизни инфекционного SARS-COV-2 в аэрозолях может зависеть от условий окружающей среды человека, и что аэрозольный вирус может оставаться инфекционным в течение длительного периода времени при некоторых условиях окружающей среды. [8]

Размер вириона SARS-COV-2 в разных источниках научной литературы варьируется от 90 до 240 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), а воздушно-капельная взвесь инфекционных частиц имеет размер капле – от 1 до 5 мкм ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$). Исходя из сравнения размеров частиц аэрозольных капле и молекул кислорода, можно предположить, что поскольку размеры даже самых мелких капле аэрозоля значительно превосходят размеры молекул газов воздуха, то основной вклад в распространение вносит процесс конвекции потоков воздуха, а в меньшей степени влияет процесс диффузии аэрозольных частиц. Выдыхаемая из легких человека смесь имеет температуру и влажность, отличающуюся от окружающей среды. Таким образом, будет происходить тепловая и концентрационная конвекция выдыхаемой смеси в окружающем воздухе.

Размер аэрозольных частиц выдыхаемой смеси сравним с размерами частиц дыма в воздухе, распространяющихся в процессе конвекции вокруг курильщика, но значительно превышает размеры единичного вириона и молекулы кислорода, как показано на Рисунке 1. Механизм распространения аэрозольных частиц подобен механизму распространения дыма и тумана в воздухе. В исследовании отечественных авторов Монастырский Л.М., Бондарев Р.В. теоретически показано, что диффузия молекул вещества не может объяснить физическое явление распространения запахов в воздухе. [9] Альтернативным механизмом, описывающим этот процесс, может быть конвекция.

Для физического понимания размеров частиц аэрозольного облака, частиц дыма и частиц вириона дана иллюстрация их размеров относительно друг друга. Сравнительный анализ размеров частиц в воздухе приведен в нанометрах (Рисунок 1).

Рассмотрим процесс тепловой конвекции частиц. Например, в условиях тепловой конвекции видно, что дым от сигарет достаточно быстро распространяется во все стороны, а не только вверх, под действием силы Архимеда, или вниз под действием силы тяжести. В этом случае речь идет о тепловой конвекции. Конвективная диффузия может быть вызвана как действием на систему разности давлений, так и гравитационным полем. Если идет речь о сигаретном дыме, то мы имеем дело с конвективной диффузией, вызванной действием силы тяжести. При распространении запаха мы, вероятнее всего, имеем дело с конвективной диффузией, вызванной разностью давлений в различных частях среды. Преобладающим механизмом этого явления может являться конвекция. [9]

При размере частиц, сравнимых с размерами молекул газа (десятые доли нм), например, молекулы спирта распространяются в воздухе под влиянием процесса диффузии. А при размере частиц, сравнимых с размером частиц дыма (порядка 1000 нм), взвесь подвергается действию преимущественно конвекции в воздухе. Поскольку

выдыхаемый воздух содержит частицы размером 5-50 мкм, то появляется конвекционный градиент концентрации и температуры.

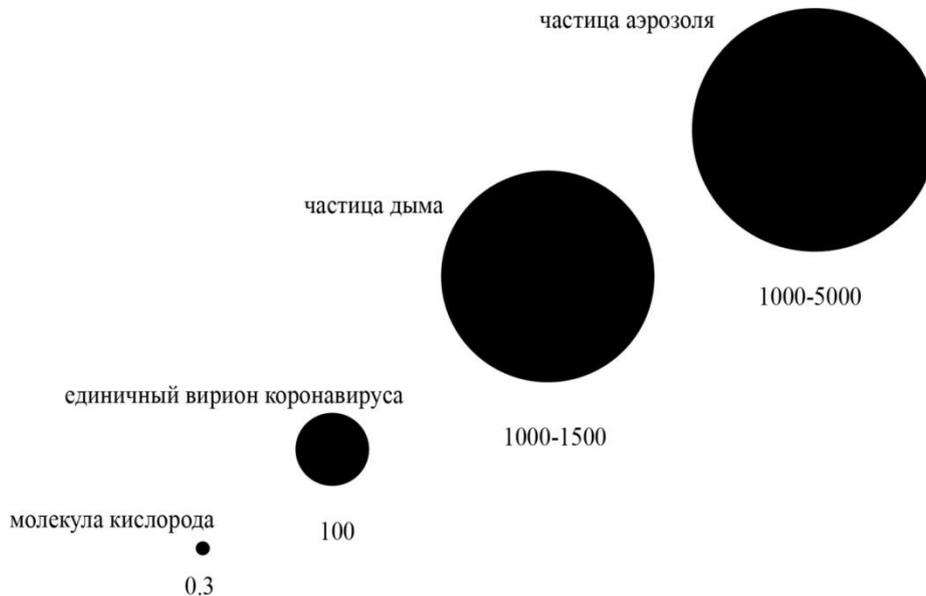


Рисунок 1 — Относительные размеры частиц в воздухе, в нанометрах (нм), 1 нм = 10^{-9} м.
Figure 1 — The relative size of particles in the air, in nanometers (nm).

В предыдущих исследованиях профессора Кармишина А.М., аспиранта РГСУ А. Козлова (05.13.11) в публикации "Analysis of initial and boundary conditions for convective diffusion of vapors and aerosols in closed volumes" описано математическое моделирование экологической оценки после отбора токсичных химических веществ. [10] В исследованиях отечественных ученых представлен математический инструментальный движения зараженного воздуха с токсическими веществами. Предложены аналитические и численные методы расчета полей мгновенных концентраций химических веществ и экспозиционных доз токсичных веществ в замкнутых пространствах. В настоящем исследовании вспышка COVID приравнивается к вспышке химической атаки аэрозольным облаком.

Применение моделирования концентрационной конвекции при различных коэффициентах турбулентной диффузии

Для отображения результатов проведенных исследований определено следующее:

1. перенос вещества, обусловленный одновременно молекулярной диффузией и макроскопическим движением среды (конвекцией), является конвективной диффузией;
2. учтено, что распространение воздушно-капельной взвеси происходит в условиях нарушения равновесности состояния среды (например, при наличии градиента концентрации);
3. при проведении математического моделирования используется уравнение состояния идеального газа, при наличии градиента концентрации в среде появляется градиент давления, который может привести к появлению конвекционных аэродинамических потоков внутри отдельных областей газа. В этом случае уже

приходится говорить о конвекции, как основном механизме распространения частиц аэрозоли выдыхаемой смеси.

В обобщении отметим, что практическое моделирование такого процесса провести достаточно сложно, поскольку возникают турбулентные течения воздуха и в помещениях, и в открытой атмосфере. Охлаждение влажного выдыхаемого воздуха изменяет концентрационный состав газовой смеси «сухой воздух – водяной пар» за счет испарения и конденсации пара соответственно.

Математическая модель реализована на языке программирования JavaScript. Компьютерная модель диффузии частиц представлена на Рисунке 2. Моделирование производилось с помощью разбиения объема и времени на сетку, после чего составлялось разностное уравнение, которое затем решалось методом Гаусса.

Параметры моделирования:

- ΔT — промежуток времени между кадрами
- X, Y, Z Length — размеры объема пространства по координатам
- X, Y, Z Points — количество точек разбиения по осям
- Turbulent diffusion — коэффициент турбулентной диффузии
- FRAME — кадр моделирования
- 0 — начальный кадр в момент времени $t = 0$; 1 — в момент времени ΔT и т. д.

Моделировалось уравнение Лапласа

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = D \Delta C$$

С нулевыми граничными условиями $C(M, t)|_{M \in \Gamma} = 0$

Начальными условиями является мгновенный источник вспышки в центре заданного объема.

Рассмотрим моделирование распространения зараженного облака, которое проводилось при различных коэффициентах турбулентной диффузии и различных температурах, Рисунки 1-5.

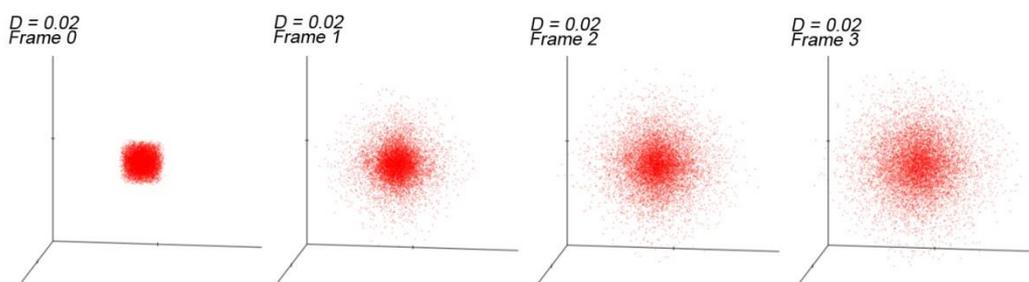


Рисунок 2 — Модель диффузии при коэффициенте $D=0.02 \text{ см}^2/\text{с}$
 Figure 2 — The diffusion model at the coefficient $D=0.02 \text{ см}^2/\text{с}$

Для моделирования распространения аэрозоля при более высокой температуре, применяется увеличенный в 10 раз коэффициент турбулентной диффузии, $D=0.2$ (Рисунок 3).

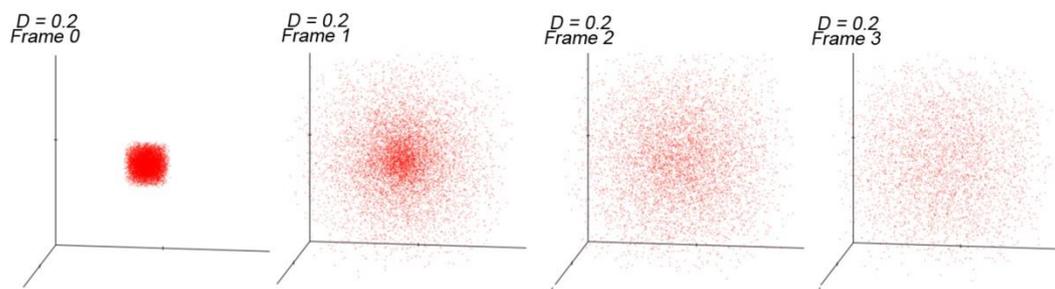


Рисунок 3 — Модель диффузии при коэффициенте $D=0.2 \text{ см}^2/\text{с}$ (при повышенной температуре).
Figure 3 — The diffusion model at the coefficient $D=0.2 \text{ см}^2/\text{с}$ (at elevated temperature).

Следующее моделирование предполагает применение поглощающего материала на границе вспышки, например, медицинской маски. В этом случае вспышка гаснет быстрее в меньшем объеме. Сравните Рисунок 4 и Рисунок 5.

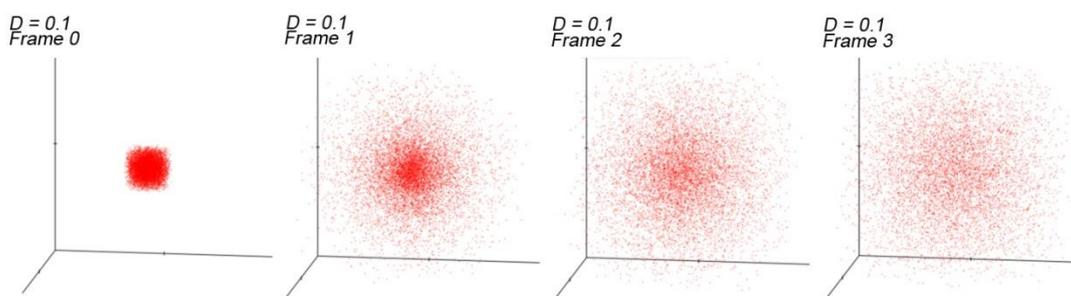


Рисунок 4 — Модель диффузии при коэффициенте $D=0.1 \text{ см}^2/\text{с}$.
Figure 4 — Diffusion model with a coefficient $D=0.1 \text{ см}^2/\text{с}$.

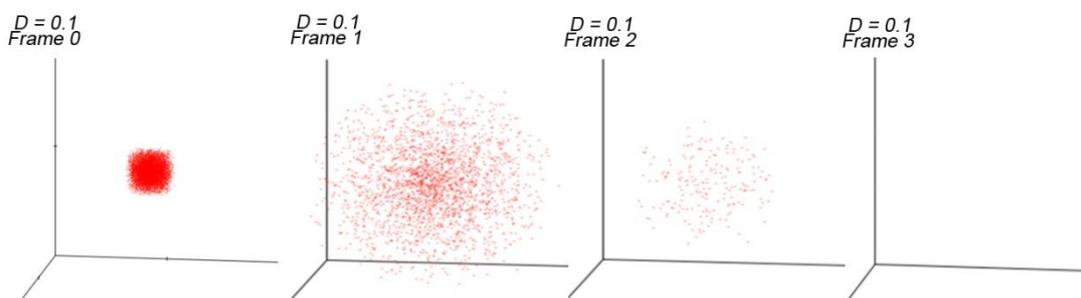


Рисунок 5 — Модель диффузии при коэффициенте $D=0.1 \text{ см}^2/\text{с}$, с применением поглощающего материала.
Figure 5 — Diffusion model with a coefficient $D=0.1 \text{ см}^2/\text{с}$, with the use of an absorbing material.

На Рисунках 2-5 показано распространение зараженного аэрозольного облака SARS-COV-2 при различных коэффициентах турбулентной диффузии, при разных температурах, с учетом наличия поглощающего материала (медицинской маски) на границе вспышки от источника.

Результатом компьютерного моделирования является 3D видео. Представленные кадры видео, выделенные с разбросом в 0.5 сек., показывают, как сильно влияет температура окружающей среды на процесс распространения вирусосодержащих частиц. С увеличением температуры скорость распространения растет. При сравнении кадров Frame 3 на Рисунок 2 и Рисунок 3 заметна большая разница объемов зараженного облака. На Рисунок 3 частицы аэрозольного облака разлетелись и заняли весь объем модели за 1 сек., в то время как Frame 3 на Рисунок 2 показывает, что частицы вируса все еще сконцентрированы в центре вспышки. Далее, сравнение Рисунок 4 и Рисунок 5 показывает, что применение медицинской маски решительным образом уменьшает количество попавших в воздух инфицированных капель, что видно при сравнении кадра Frame 1 на Рисунках 4 и 5. Визуально заметно, что на Рисунок 5 концентрация вирусных частиц в моделируемом объеме воздуха снижается в течение 1,5 секунд практически до нуля.

Результаты математического и компьютерного моделирования распространения зараженного аэрозольного облака

Анализ проведенных исследований показал, что имеющиеся эпидемиологические данные о доказанных случаях передачи вируса указывают на то, что SARS-COV-2 распространяется преимущественно через воздушно-капельную передачу на небольшом расстоянии (менее 2 метров). Возможный вклад инфекционных аэрозолей в нынешнюю пандемию требует дальнейшего изучения. Исследования близкородственных вирусов доказывают возможность воздушной передачи инфекции. Компьютерное моделирование процесса передачи вируса по воздуху в виде воздушно-капельной смеси описывает распространение вируса на людей, находящихся далее 2 метров от источника заражения, или зашедших в помещение через некоторое время после того, как из него вышел инфицированный человек. Аэрозоли слюны инфицированных лиц могут представлять угрозу для вдыхания даже на значительных расстояниях в закрытых помещениях, особенно при плохой вентиляции.

В основе моделирования воздушно-капельного переноса инфекции рассмотрены физические явления конвекционной диффузии в газовой среде. На основе модели сделан вывод о том, что при повышении температуры конвекционные процессы протекают быстрее, то есть аэрозоль с вирусами распространяется быстрее, но исчезает за счет испарения влаги каплей также быстрее. При условии применения пористого материала на границе вспышки, например, тканевой медицинской маски, диффузия гаснет быстрее и в меньшем объеме воздуха, распространение частиц задерживается. Компьютерное моделирование позволяет увидеть изменение концентрации вирусосодержащих частиц в воздухе с течением времени.

Заключение

В основе моделирования воздушно-капельного переноса инфекции рассмотрено физическое явление конвекционной диффузии в газовой среде. На основе модели сделан вывод о том, что при повышении температуры диффузионные процессы протекают быстрее, то есть аэрозоль с вирусами распространяется быстрее, но исчезает за счет испарения влаги каплей также быстрее. При условии применения пористого материала на границе инфекционной вспышки от источника, например, тканевой медицинской

маски, диффузия зараженных частиц происходит в меньшем объеме воздуха, распространение частиц задерживается. Компьютерное моделирование демонстрирует этапы распространения вирусосодержащего облака с течением времени. Результаты компьютерного моделирования соответствуют результатам измерений распространения вируса, приведенных в исследованиях других авторов, что подтверждает применимость математического моделирования процессов диффузии для описания распространения вируса в воздухе. В исследовании представлена компьютерная модель воздушно-капельного пути распространения SARS-COV-2 в воздухе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Asadi S., Wexler A.S., Cappa C.D. et al. Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Scientific Reports*. 2019;9(2348). Доступно по: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>. DOI: 10.1038/s41598-019-38808-z (дата обращения: 20.01.2021).
2. Philip Anfinrud, Ph.D. Visualizing Speech-Generated Oral Fluid Droplets with Laser Light Scattering. *New England Journal of Medicine*. 2020;382:2061-2063. Доступно по: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/nejmc2007800>. DOI: 10.1056/nejmc2007800 (дата обращения: 20.01.2021).
3. David A. Edwards, Jonathan C. Man, Peter Brand, Jeffrey P. Katstra, K. Sommerer, Howard A. Stone, Edward Nardell, Gerhard Scheuch. Inhaling to mitigate exhaled bioaerosols. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004;101(50):17383-17388. Доступно по: <https://www.pnas.org/content/101/50/17383>. DOI: 10.1073/pnas.0408159101 (дата обращения: 20.01.2021).
4. Landman W.J.M., J.H.H Van Eck. Aerosolization of Newcastle Disease Vaccine Virus and Enterococcus Faecalis. *Avian Diseases*. 2001;45(3):684-87. Доступно по: <https://www.jstor.org/stable/1592912>. DOI:10.2307/1592912 (дата обращения: 20.01.2021).
5. Van Doremalen N., Bushmaker T. et al. Aerosol and surface stability of SARS-COV-2 as compared with SARS-COV-1. *New England Journal of Medicine*. 2020;382:1564-1567. Доступно по: <https://www.nejm.org/doi/10.1056/NEJMc2004973>. DOI: 10.1056/NEJMc2004973 (дата обращения: 20.01.2021).
6. Ignatius T.S. Yu, M.B., B.S., M.P.H., Yuguo Li et al. Evidence of Airborne Transmission of the Severe Acute Respiratory Syndrome. *New England Journal of Medicine*. 2004;350:1731-1739. Доступно по: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/nejmoa032867>. DOI: 10.1056/NEJMoA032867 (дата обращения: 20.01.2021).
7. Zhang H., Li X., Ma R. et al. Airborne spread and infection of a novel swine-origin influenza A (H1N1) virus. *Virology Journal*. 2013;10(204). Доступно по: <https://doi.org/10.1186/1743-422X-10-204>. DOI: 10.1186/1743.422X.10.204 (дата обращения: 20.01.2021).
8. Paul Dabisch, Michael Schuit et al. The influence of temperature, humidity, and simulated sunlight on the infectivity of SARS-CoV-2 in aerosols. *Aerosol Science and Technology*. 2021;55(2):142-153. Доступно по: <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1829536>. DOI: 10.1080/02786826.2020.1829536 (дата обращения: 20.01.2021).
9. Монастырский Л.М., Бондарев Р.В. К вопросу о механизме распространения запаха в воздухе. *Успехи современного естествознания*. 2014;12(4):448-450. Доступно по: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=34632> (дата обращения: 20.01.2021).
10. Veretkhina S.V. A.M. Karmishin, A.D. Kozlov. Analysis of initial and boundary conditions for convective diffusion of vapors and aerosols in closed volumes. *EurAsian Journal of BioSciences*. 2020;14(1):995-1002. Доступно по: <http://www.ejobios.org/article/analysis-of-initial-and-boundary-conditions-for-convective-diffusion-of-vapors-and-aerosols-in-7586> (дата обращения: 20.01.2021).

11. Maggiore Ettore, Tommasini Matteo, Ossi Paolo. Propagation in outdoor environments of aerosol droplets produced by breath and light cough. *Aerosol Science and Technology*. 2020;55(3):1-12. Доступно по: <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1847247>. DOI: 10.1080/02786826.2020.1847247 (дата обращения: 20.01.2021).
12. Сомов С.А., Иванов А.С. Исследование термоконтрационной конвекции во влажном воздухе методом голографической интерферометрии. *Вестник Пермского университета. Физика*. 2020;2:48–56. Доступно по: <http://press.psu.ru/index.php/phys/article/view/3233/2339>. DOI: 10.17072/1994-3598-2020-2-48-56 (дата обращения: 20.01.2021).

REFERENCES

1. Asadi S., Wexler A.S., Cappa C.D. et al. Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Scientific Reports*. 2019;9(2348). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>. DOI: 10.1038/s41598-019-38808-z (accessed 20.01.2021).
2. Philip Anfinrud, Ph.D. Visualizing Speech-Generated Oral Fluid Droplets with Laser Light Scattering. *New England Journal of Medicine*. 2020;382:2061-2063. Available at: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/nejmc2007800>. DOI: 10.1056/nejmc2007800 (accessed 20.01.2021).
3. David A. Edwards, Jonathan C. Man, Peter Brand, Jeffrey P. Katstra, K. Sommerer, Howard A. Stone, Edward Nardell, Gerhard Scheuch. Inhaling to mitigate exhaled bioaerosols. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004;101(50):17383-17388. Available at: <https://www.pnas.org/content/101/50/17383>. DOI: 10.1073/pnas.0408159101 (accessed 20.01.2021).
4. Landman W.J.M., J.H.H Van Eck. Aerosolization of Newcastle Disease Vaccine Virus and Enterococcus Faecalis. *Avian Diseases*. 2001;45(3):684-87. Available at: <https://www.jstor.org/stable/1592912>. DOI:10.2307/1592912 (accessed 20.01.2021).
5. Van Doremalen N., Bushmaker T. et al. Aerosol and surface stability of SARS-COV-2 as compared with SARS-COV-1. *New England Journal of Medicine*. 2020;382:1564-1567. Available at: <https://www.nejm.org/doi/10.1056/NEJMc2004973>. DOI: 10.1056/NEJMc2004973 (accessed 20.01.2021).
6. Ignatius T.S. Yu, M.B., B.S., M.P.H., Yuguo Li et al. Evidence of Airborne Transmission of the Severe Acute Respiratory Syndrome. *New England Journal of Medicine*. 2004;350:1731-1739. Available at: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/nejmoa032867>. DOI: 10.1056/NEJMoa032867 (accessed 20.01.2021).
7. Zhang H., Li X., Ma R. et al. Airborne spread and infection of a novel swine-origin influenza A (H1N1) virus. *Virology Journal*. 2013;10(204). Available at: <https://doi.org/10.1186/1743-422X-10-204>. DOI: 10.1186/1743.422X.10.204 (accessed 20.01.2021).
8. Paul Dabisch, Michael Schuit et al. The influence of temperature, humidity, and simulated sunlight on the infectivity of SARS-CoV-2 in aerosols. *Aerosol Science and Technology*. 2021;55(2):142-153. Available at: <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1829536>. DOI: 10.1080/02786826.2020.1829536 (accessed 20.01.2021).
9. Monastyrkiy L.M., Bondarev R.V. To the question of the mechanism of distribution of the smell in air. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2014;12(4):448-450. Available at: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=34632>. (In Russ) (accessed 20.01.2021).
10. Veretekhina S.V. A.M. Karmishin, A.D. Kozlov. Analysis of initial and boundary conditions for convective diffusion of vapors and aerosols in closed volumes. *EurAsian Journal of BioSciences*. 2020;14(1):995-1002. Available at: <http://www.ejobios.org/article/analysis-of-initial-and-boundary-conditions-for-convective-diffusion-of-vapors-and-aerosols-in-7586>

(accessed 20.01.2021).

11. Maggiore Ettore, Tommasini Matteo, Ossi Paolo. Propagation in outdoor environments of aerosol droplets produced by breath and light cough. *Aerosol Science and Technology*. 2020;55(3):1-12. Available at: <https://doi.org/10.1080/02786826.2020.1847247>. DOI: 10.1080/02786826.2020.1847247 (accessed 20.01.2021).
12. Somov S.A., Ivanov A.S. Study of thermosolutal convection in moist air by holographic interferometry method. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2020(2):48–56. Available at: <http://press.psu.ru/index.php/phys/article/view/3233/2339>. (In Russ). DOI: 10.17072/1994-3598-2020-2-48-56 (accessed 20.01.2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Веретехина Светлана Валерьевна, заместитель декана по науке, факультет информационных технологий, ФГБОУ ВО "Российский государственный социальный университет», кандидат экономических наук, Dr.Sc.(Tech), доцент факультета информационных технологий, Российский государственный социальный университет, Москва. Российская Федерация.

e-mail: veretehinas@mail.ru

ORCID: [0000-0003-3014-5027](https://orcid.org/0000-0003-3014-5027)

Svetlana V. Veretekhina, Deputy Dean for science, Faculty of Information Technologies, FSBEI he "Russian state social University", candidate of economic Sciences, Dr. Sc.(Tesh), Associate Professor, Faculty of Information Technologies, Russian State Social University, Moscow. Russian Federation.

Зайковский Владимир Игоревич, ФГБОУ ВО "Российский государственный социальный университет», студент факультета Информационных технологий, Российский государственный социальный университет, Москва, Российская Федерация.

Zaikovskii Vladimir Igorevich, FSBEI he "Russian state social University", student in the Faculty of Information Technologies, Russian State Social University, Moscow. Russian Federation.