

## Математическая основа программного комплекса для оценки вероятности заражения вирусной инфекцией в зданиях с массовым пребыванием людей

К. Ю. Литвинцев<sup>1,\*</sup>, А. А. Дектерев<sup>1</sup>, Е. С. Кирик<sup>2</sup>, Т. Б. Витова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Красноярский филиал института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 660036, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительного моделирования СО РАН — обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, 660036, Красноярск, Россия

\*Контактный автор: Литвинцев Кирилл Юрьевич, e-mail: [sttupick@yandex.ru](mailto:sttupick@yandex.ru)

Поступила 3 февраля 2021 г., доработана 26 июня 2021 г., принята в печать 30 июня 2021 г.

Текущая пандемия COVID-19 показала, что у принимающих решения органов власти отсутствуют инструменты, которые бы позволяли принимать обоснованные решения по введению карантинных мер, проведению/отмене массовых мероприятий в зданиях. Зачастую это приводит к введению либо избыточных (что вызывает ухудшение экономической ситуации), либо недостаточных мер (что приводит к ухудшению эпидемиологической ситуации). В настоящей статье дано описание математической основы и базовых принципов создания программного комплекса для оценивания вероятности заражения вирусной инфекцией, передающейся воздушно-капельным путем, в зданиях с массовым пребыванием людей.

*Ключевые слова:* вирус, аэрозоль, численное моделирование, вентиляция, движение людей, риск заражения.

*Цитирование:* Литвинцев К.Ю., Дектерев А.А., Кирик Е.С., Витова Т.Б. Математическая основа программного комплекса для оценки вероятности заражения вирусной инфекцией в зданиях с массовым пребыванием людей. Вычислительные технологии. 2021; 26(4):73–81. DOI:10.25743/ICT.2021.26.4.007.

### Введение

Оценивание вероятности заражения COVID-19 в общественных местах возможно на основе совместного анализа результатов численного моделирования движения людей, циркуляции воздуха и распространения аэрозолей от носителя инфекции с учетом применяемых способов защиты (маски, вентиляция). Требуется разработать методы оценки опасности заражения COVID-19 от носителя вируса и способы защиты (маски, вентиляция) в общественных зданиях, которые учитывают перемещение людей в соответствии с режимом функционирования, движение воздуха, в том числе под действием систем вентиляции, и распространение вирусосодержащих аэрозолей.

Методы вычислительной гидродинамики для моделирования движения воздуха, подходы Лагранжа и Эйлера при моделировании распространения дыхательных аэрозолей (с учетом данных о влиянии защитных средств) совместно с моделью движения людей индивидуально-проточного типа (для получения траекторий перемещений людей и последующего построения “тепловых” карт, отображающих результаты совместного анализа результатов моделирования) могут являться математической базой для создания программного инструмента.

На данный момент уже существует множество работ (и их количество продолжает активно наращиваться на фоне пандемии), посвященных изучению вопроса распространения вирусосодержащих аэрозолей от инфицированного человека в газовой среде. В данных исследованиях рассматриваются вопросы переноса вируса на аэрозолях при различных условиях среды [1], разной активности человека [2] и дыхательной деятельности (дыхание, разговор, речь, кашель и чихание) [3–5], а также влияния защитных масок [6]. COVID-19 вызвал активизацию работ по анализу распространения вирусов воздушно-капельным путем, но исследования в данной области безусловно проводились ранее. Так, в работе [7] был проведен анализ распределения капель по размеру, который показал, что основной массив капель имеет размер от 50 до 150 мкм, в целом же диапазон размеров капель при различной дыхательной активности может варьироваться от 0.1 мкм до 1 мм [7–9]. В работе [10] проведено экспериментальное исследование влияния различных защитных масок на формирование возмущенной струи при кашле человека. В различных условиях разлет аэрозолей от инфицированного человека может варьироваться от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. Время жизни капель зависит от их размера, влажности и скорости воздушного потока и может достигать 6 мин.

При моделировании движения аэрозоля в газовой среде для описания сплошной среды, как правило, решают уравнения Навье – Стокса. Для моделирования турбулентности течения применяют как LES-модели [11], так и различные RANS-модели: SST [6, 12],  $k-\varepsilon$  [13]. Для моделирования движения капель используется подход Лагранжа с учетом процессов испарения и конденсации, которые влияют на фракционный состав и время жизни аэрозолей. В свою очередь на данные процессы оказывает влияние влажность воздуха. Так, в работе [12] показано, что повышенная влажность ведет к увеличению размеров капель и ускорению их осаждения, а низкая влажность — к уменьшению размера капель и более длительному их витанию на опасной для человека высоте. Таким образом, воздухообмен, тип дыхательной активности и защитные маски определяют характер распространения вирусосодержащих аэрозолей.

Разрабатываются модели распространения (миграции) среди людей вируса на макроуровне [14] в рамках территорий с горизонтом прогноза на месяцы. В этом случае не рассматриваются физические процессы, происходящие при передаче вируса от человека к человеку, но используются статистические данные по продолжительности инкубационного периода, гендерному и возрастному составу населения на территории, видам занятости населения, логистические связи территории и другие значимые характеристики территорий/государств.

В настоящей статье рассмотрены возможности разработанного ПО “Сигма ПБ” [15] в контексте задачи оценивания вероятности заражения вирусной инфекцией, распространяемой воздушно-капельным путем, при нахождении в здании и предлагаемые подходы к использованию результатов исследований других авторов по распространению аэрозолей с учетом средств защиты и условий среды.

## 1. Математический аппарат для моделирования рассматриваемых процессов и его программная реализация

В красноярском филиале ИТ СО РАН совместно с ИВМ СО РАН разработан математический аппарат программного комплекса “Сигма ПБ”, позволяющий численно моделировать развитие пожара в зданиях и эвакуацию [15]. Реализованные математические модели вычислительной гидродинамики и движения людей, а также инструментарий ввода данных и анализа результатов расчетов в программе “Сигма ПБ” могут быть адаптированы для решения задачи оценки распространения вирусной инфекции в зданиях с массовым пребыванием людей. Гидродинамическая модель и модель движения частиц позволят оценить влияние воздухообмена на распространение вирусосодержащих аэрозолей, модель движения — проанализировать длительность и дистанцию контактов.

Воздухообмен, особенно при наличии развитой системы вентиляции и теплообмена, может иметь достаточно сложный, неоднородный характер (рис. 1). Оценку воздухообмена можно проводить на основании двух подходов:

- 1) анализ поля скорости воздушных потоков в области пребывания людей (рис. 1, *а*);
- 2) анализ распространения частиц-маркеров от приточной вентиляции (рис. 1, *б*).

Анализ поля скорости позволит определить области, где с одной стороны скорость ниже критического минимального значения, а с другой не превышает максимально допустимое значение для комфортного пребывания людей. Анализ распространения

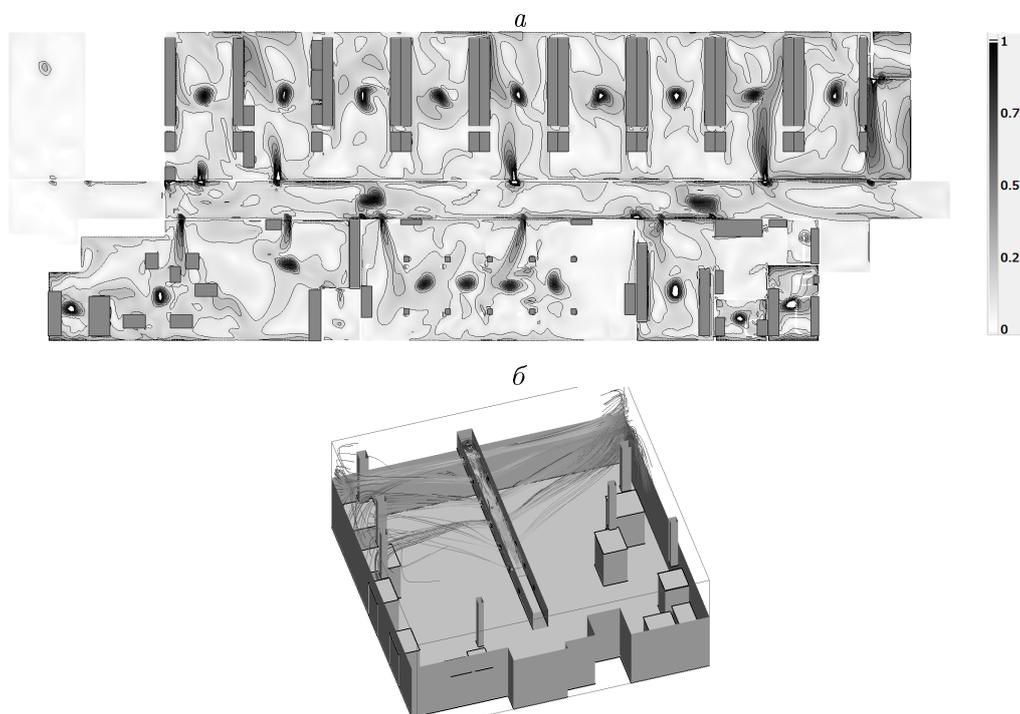


Рис. 1. Пример неоднородности воздухообмена при использовании приточно-вытяжной вентиляции: *а* — офисное здание, поле скоростей, м/с; *б* — работа приточно-вытяжной вентиляции, траектории частиц-маркеров

Fig. 1. Examples of air exchange inhomogeneity under supply and exhaust ventilation using: *a* — office building, scalar velocity, m/s; *b* — supply and exhaust ventilation, marker particle trajectories

частиц-маркеров от приточных элементов вентиляции позволит проанализировать доступ свежего воздуха и определить эффективность работы отдельных элементов системы вентиляции.

Для моделирования воздухообмена, который является турбулентным нестационарным течением, в программе используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса (RANS). Для замыкания уравнений Рейнольдса используются двухпараметрическая  $k - \omega$  SST-модель [16], как и в ранее представленных работах других авторов.

Анализ распространения аэрозолей для рассчитанного поля скорости (воздухообмена) от носителя инфекции позволит оценить время витания и область осаждения капель от источника заражения при заданной дыхательной активности и наличии/отсутствии маски. Для решения этой задачи можно использовать реализованную в программе диффузионно-инерционную модель движения малоинерционных частиц ввиду их малого размера [17], которая является упрощением двухжидкостной модели дисперсных потоков. В этом случае уравнения переноса дисперсной фазы в предположении малости отклонений скоростей частиц от скорости несущей фазы редуцируются к одному уравнению конвективно-диффузионного типа для концентрации примеси. Диффузионно-инерционная модель позволяет провести расчет распространения мелкодисперсной примеси в турбулентных потоках с учетом ряда инерционных механизмов переноса (действия массовых сил и переноса вследствие отклонения траекторий частиц от линий тока газа при их искривлении и из-за нестационарности потока), а также исследовать механизмы испарения и конденсации аэрозолей. Основное достоинство данной модели при проведении расчетов по оценке распространения вируса — это ее экономичность по сравнению с подходом Лагранжа, используемым в данной тематике в основном для исследовательских расчетов.

Моделирование движения людей с учетом воздухообмена и распространения вирусосодержащих аэрозолей позволит оценить опасность распространения вируса для конкретного объекта с заданными условиями и режимом его функционирования. Моделирование движения людей осуществляется на базе математической модели индивидуально-поточного типа. Эта модель является наиболее универсальной и позволяет моделировать движение каждого отдельного человека с учетом окружающей обстановки (других людей, препятствий) в зданиях со сложной внутренней инфраструктурой без ограничений на локальную плотность. Можно моделировать следующие явления, свойственные поточному движению: слияние потоков, переформирование (растекание, уплотнение), образование и рассасывание скоплений, обтекание поворотов, движение в помещениях с развитой внутренней планировкой, противотоки и пересекающиеся потоки. Размеры и формы проекции людей, скорости свободного движения могут задаваться индивидуально в зависимости от цели моделирования.

Скорость движения человека определяется текущей плотностью потока. Движение людей рассматривается в евклидовом пространстве на плоскости (все вертикальные связи проецируются на плоскость), учитываются внешние границы расчетной области, внешние стены здания, выходы наружу, внутренние границы, внутренние стены, контуры мебели, расчетная область, которая состоит из помещений, связанных проемами, начальное расположение людей в этом пространстве, скорость свободного движения каждого человека, площадь проекции. В каждый момент времени  $t$  положение каждого человека определяется через предыдущую координату и величину сдвига, вычисляемого по текущей ситуации (плотности) по оси движения.

## 2. Анализ результатов моделирования

Реализованные в ПО “Сигма ПБ” инструменты анализа позволяют формировать так называемые тепловые карты: поле интенсивности движения людей (рис. 2, *а*) и поле интенсивности скоплений (рис. 2, *б*). Эти инструменты анализа использованы для оценки организации безопасного движения на спортивных объектах, где проходили мероприятия FIFA 2017 и 2018 гг. [18], Зимняя Универсиада 2019 г. в г. Красноярске [19].

Используемая в ПО “Сигма ПБ” модель движения людей позволяет отслеживать движение каждого человека в отдельности, а также задавать ему траекторию движения и “поведения”, т. е. создавать различные сценарии со своим набором условий на объектах с массовым пребыванием людей. Для каждого из этих сценариев можно отслеживать длительность и дистанцию контактов инфицированного человека с остальными людьми. В рамках сценария каждый человек может рассматриваться как источник заражения. При этом длительность контакта и область заражения предлагается рассматривать для двух вариантов: с учетом поля скорости воздушных потоков и без его учета.

Для определения формы области заражения предполагается использовать опубликованные расчетные данные, например, в работах [1–6]. Так как каждый человек имеет свою траекторию движения, то и область, в которой существует вероятность заражения, может быть не изотропной, а ориентированной в сторону движения. На основании подобного моделирования предлагается строить (“тепловые”) карты распространения инфекции для зданий с массовым пребыванием людей. Подобный анализ без моделирования распространения вируссодержащих частиц можно проводить с использованием ПО “Сигма ПБ” при изменении в основном только интерфейса задания данных и инструментов анализа.

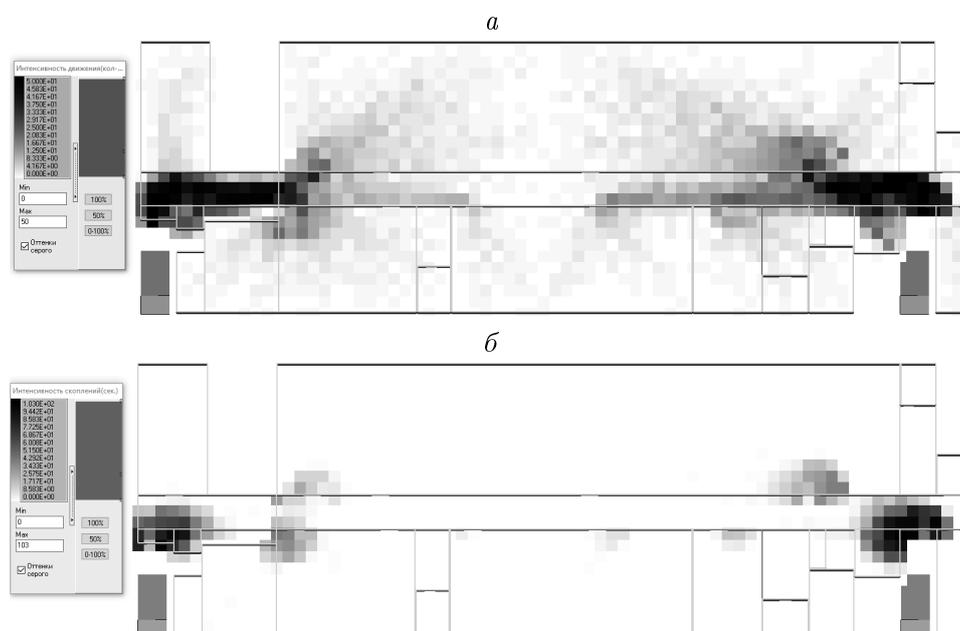


Рис. 2. Примеры “тепловых” карт движения людей на этаже офисного здания: *а* — поле интенсивности движения, *б* — поле интенсивности скопления людей

Fig. 2. Examples of “heat” people’s movement maps in an office floor: *a* — traffic intensity, *b* — crowding intensity

Дальнейшая интеграция моделей гидродинамики и движения людей, а также подключение адаптированной диффузионно-инерционной модели движения частиц позволят решать задачу моделирования распространения вируса в зданиях на новом качественном уровне. Предполагается проведение расчета поля скорости воздушных потоков с учетом работы систем вентиляции, при этом циркуляция воздуха может носить как стационарный, так и нестационарный характер. Источник вирусосодержащих аэрозолей предполагается динамический (или статический) — это люди, имеющие рассчитываемую скорость движения. Дальнейшее распространение аэрозолей рассчитывается на основе диффузионно-инерционной модели с учетом испарения, конденсации и осаждения. Полученное нестационарное поле аэрозолей (как витающих в воздухе, так и осажденных) предполагается накладывать на траектории движения людей с учетом скорости их перемещения и длительности и интенсивности их контактов.

На основе разработанного программного инструмента для выбранных зданий одного или схожего функционального назначения предполагается проведение серии расчетов для получения обобщенных закономерностей распространения вирусной инфекции как для зданий в целом, так и для отдельных его элементов. С этой целью сначала необходимо провести анализ зданий с массовым пребыванием людей для выделения типовых/подобных ситуаций с точки зрения геометрии помещений, аэродинамики и теплообмена, маршрутов движения людей и взаимодействия перечисленных факторов. Особенностью зданий с массовым пребыванием людей является наличие множества разнообразных проектных решений, однако, несмотря на это, возможно проведение обобщений: во-первых, функциональное назначение определяет требования к режиму вентиляции, теплообмену и частично к пребыванию людей; во-вторых, возможно наличие отдельных схожих элементов/помещений в зданиях (например, кинозалах); в-третьих, набор архитектурных решений для большинства зданий носит ограниченный характер.

## Заключение

Состав расчетных инструментов, реализованный в ПО “Сигма ПБ”, при определенной адаптации под специфику задачи, может быть использован для грубой оценки распространения вирусной инфекции в местах скопления людей. Дальнейшая интеграция моделей гидродинамики и движения людей и подключение диффузионно-инерционной модели движения частиц даст возможность решать данную задачу на качественно новом уровне, в частности давать оценки вероятности заражения с учетом объемно-планировочных решений зданий, вентиляции, использования защитных средств, направления движения людей, распространения вирусосодержащих аэрозолей и т. д. Это позволит с помощью моделирования определять условия функционирования различных объектов, при которых вероятность заражения для людей будет минимальна.

На данный момент для практической реализации изложенного в статье подхода к моделированию рассматриваемых процессов требуется решение следующих смежных задач:

- определение критического времени контакта при различных концентрациях вирусосодержащих аэрозолей;
- формализация человека как источника инфекции;
- задание вероятности заражения в зависимости от таких факторов, как дистанция, время пребывания в вирусосодержащем аэрозольном облаке, время пребывания вблизи инфицированного человека и т. д.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (0257-2021-0001) и ИВМ СО РАН.

## Список литературы

- [1] **Wang B., Wu H., Wan X.** Transport and fate of human expiratory droplets — A modelling approach. *Physics of Fluids*. 2020; 32(8):083307. DOI:10.1063/5.0021280.
- [2] **Blocken B., Malizia F., van Druenen T., Marchal T.** Towards aerodynamically equivalent COVID-19 1.5 m social distancing for walking and running. (Preprint). 12 p. Available at: [http://www.urbanphysics.net/COVID19\\_Aero\\_Paper.pdf](http://www.urbanphysics.net/COVID19_Aero_Paper.pdf) (accessed 21.04.2020).
- [3] **Mittal R., Ni R., Seo J.-H.** The flow physics of COVID-19. *Journal of Fluid Mechanics*. 2020; (894):F2. DOI:10.1017/jfm.2020.330.
- [4] **Bourouiba L.** Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: Potential implications for reducing transmission of COVID-19. *Journal of the American Medical Association*. 2020; 323(18):1837–1838. DOI:10.1001/jama.2020.4756.
- [5] **Asadi S., Bouvier N., Wexler A.S., Ristenpart W.D.** The coronavirus pandemic and aerosols: Does COVID-19 transmit via expiratory particles? *Aerosol Science and Technology*. 2020; 54(6):635–638. DOI:10.1080/02786826.2020.1749229.
- [6] **Dbouk T., Drikakis D.** On respiratory droplets and face masks. *Physics of Fluids*. 2020; 32(6):063303. DOI:10.1063/5.0015044.
- [7] **Xie X., Li Y., Sun H., Liu L.** Exhaled droplets due to talking and coughing. *Journal of the Royal Society Interface*. 2009; 6(SUPPL. 6):S703–S714. DOI:10.1098/rsif.2009.0388.focus.
- [8] **Han Z.Y., Weng W.G., Huang Q.Y.** Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze. *Journal of the Royal Society Interface*. 2013; 10(88):20130560. DOI:10.1098/rsif.2013.0560.
- [9] **Yang S., Lee G.W.M., Chen C.-M., Wu C.-C., Yu K.-P.** The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects. *Journal of Aerosol Medicine*. 2007; 20(4):484–494. DOI:10.1089/jam.2007.0610.
- [10] **Tang J.W., Liebner T.J., Craven B.A., Settles G.S.** A schlieren optical study of the human cough with and without wearing masks for aerosol infection control. *Journal of the Royal Society Interface*. 2009; 6(SUPPL. 6):727–736. DOI:10.1098/rsif.2009.0295.focus.
- [11] **Pendar M.-R., Pascoa J.C.** Numerical modelling of the distribution of virus carrying saliva droplets during sneeze and cough. *Physics of Fluids*. 2020; 32(8):0018432. DOI:10.1063/5.0018432.
- [12] **Feng Y., Marchal T., Sperry T., Yi H.** Influence of wind and relative humidity on the social distancing effectiveness to prevent COVID-19 airborne transmission: A numerical study. *Journal of Aerosol Science*. 2020; (147):105585. DOI:10.1016/j.jaerosci.2020.105585.8.
- [13] **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.
- [14] **De-Leon H., Pederiva F.** Particle modelling of the spreading of coronavirus disease (COVID-19). *Physics of Fluids*. 2020; 32(8):087113. DOI:10.1063/5.0020565.
- [15] **Литвинцев К.Ю., Кирик Е.С., Дектерев А.А., Харламов Е.Б., Малышев А.В., Попел Е.В.** Расчетно-аналитический программный комплекс “Сигма ПБ” по моделированию развития пожара и эвакуации. *Пожарная безопасность*. 2016; (4):51–59.
- [16] **Menter F.R.** Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA Paper*. 1993; (93):2906. DOI:10.2514/6.1993-2906.

- [17] **Zaichik L.I., Drobyshevsky N.I., Filippov A.S., Mukin R.V., Strizhov V.F.** A diffusion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010; 53(1–3):154–162. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.044.
- [18] **Kirik E., Malyshev A., Vitova T., Popel E., Kharlamov E.** Pedestrian movement simulation for stadiums design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456(1):012074. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012074.
- [19] **Kirik E., Malyshev A.** Computer simulation of pedestrian flows for Universiade 2019 sport facilities versus hand calculations. *Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics 2016, Collective Dynamics*. 2016: 446–454. DOI:10.17815/CD.2016.11.

Вычислительные технологии, 2021, том 26, № 4, с. 73–81. © ФИЦ ИВТ, 2021  
Computational Technologies, 2021, vol. 26, no. 4, pp. 73–81. © FRC ICT, 2021

ISSN 1560-7534  
eISSN 2313-691X

---

INFORMATION TECHNOLOGIES

---

DOI:10.25743/ICT.2021.26.4.007

**The mathematical foundation of a software package for assessing the probability of a viral infection in massively occupied buildings**

LITVINTSEV KIRILL YU.<sup>1,\*</sup>, DEKTEREV ALEKSANDR A.<sup>1</sup>, KIRIK EKATERINA S.<sup>2</sup>, VITOVA TAT'YANA B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Krasnoyarsk Department of Institute of Thermophysics of SB RAS, 660036, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Computational Modelling — Subdivision of FRC KSC SB RAS, 660036, Krasnoyarsk, Russia

\*Corresponding author: Litvintsev Kirill Yu., e-mail: [sttupick@yandex.ru](mailto:sttupick@yandex.ru)

*Received February 3, 2021, revised June 26, 2021, accepted June 30, 2021.*

**Abstract**

The current COVID-19 pandemic has shown that decision-making authorities lack tools that would allow them to make informed decisions on the introduction of quarantine measures related to either holding or canceling mass events in buildings. Often this leads either to the introduction of excessive (which leads to a worsening of the economic situation) or insufficient measures (which leads to a worsening of the epidemiological situation). This article describes the mathematical basic principles aimed at creating a software package for assessing the likelihood of contracting a viral infection transmitted by airborne droplets in massively occupied buildings.

Evaluation of the likelihood of COVID-19 infection in public places is possible based on a joint analysis of the results of the people movement simulation, air circulation and the spread of aerosols from a carrier of the infection, taking into account the applied methods of protection (masks, ventilation). It is required to develop methods for assessing the danger of COVID-19 infection from a carrier of the virus and the methods of protection used (masks, ventilation) in specific public places. Simultaneously, the movement of people in accordance with the mode of operation, air movement (including ventilation systems) and the spread of respiratory aerosols needs to be accounted for.

*Keywords:* viruses, aerosols, numerical simulation, ventilation, pedestrian dynamics, risk of infection.

*Citation:* Litvintsev K.Yu., Dekterev A.A., Kirik E.S., Vitova T.B. The mathematical foundation of a software package for assessing the probability of a viral infection in massively occupied buildings. *Computational Technologies*. 2021; 26(4):73–81. DOI:10.25743/ICT.2021.26.4.007. (In Russ.)

**Acknowledgements.** This research was supported by state contract of IT SB RAS (0257-2021-0001) and ICM SB RAS.

### References

1. **Wang B., Wu H., Wan X.** Transport and fate of human expiratory droplets — A modelling approach. *Physics of Fluids*. 2020; 32(8):083307. DOI:10.1063/5.0021280.
2. **Blocken B., Malizia F., van Druenen T., Marchal T.** Towards aerodynamically equivalent COVID-19 1.5 m social distancing for walking and running. (Preprint). 12 p. Available at: [http://www.urbanphysics.net/COVID19\\_Aero\\_Paper.pdf](http://www.urbanphysics.net/COVID19_Aero_Paper.pdf) (accessed 21.04.2020).
3. **Mittal R., Ni R., Seo J.-H.** The flow physics of COVID-19. *Journal of Fluid Mechanics*. 2020; (894):F2. DOI:10.1017/jfm.2020.330.
4. **Bourouiba L.** Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: Potential implications for reducing transmission of COVID-19. *Journal of the American Medical Association*. 2020; 323(18):1837–1838. DOI:10.1001/jama.2020.4756.
5. **Asadi S., Bouvier N., Wexler A.S., Ristenpart W.D.** The coronavirus pandemic and aerosols: Does COVID-19 transmit via expiratory particles? *Aerosol Science and Technology*. 2020; 54(6):635–638. DOI:10.1080/02786826.2020.1749229.
6. **Dbouk T., Drikakis D.** On respiratory droplets and face masks. *Physics of Fluids*. 2020; 32(6):063303. DOI:10.1063/5.0015044.
7. **Xie X., Li Y., Sun H., Liu L.** Exhaled droplets due to talking and coughing. *Journal of the Royal Society Interface*. 2009; 6(SUPPL. 6):S703–S714. DOI:10.1098/rsif.2009.0388.focus.
8. **Han Z.Y., Weng W.G., Huang Q.Y.** Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze. *Journal of the Royal Society Interface*. 2013; 10(88):20130560. DOI:10.1098/rsif.2013.0560.
9. **Yang S., Lee G.W.M., Chen C.-M., Wu C.-C., Yu K.-P.** The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects. *Journal of Aerosol Medicine*. 2007; 20(4):484–494. DOI:10.1089/jam.2007.0610.
10. **Tang J.W., Liebner T.J., Craven B.A., Settles G.S.** A schlieren optical study of the human cough with and without wearing masks for aerosol infection control. *Journal of the Royal Society Interface*. 2009; 6(SUPPL. 6):727–736. DOI:10.1098/rsif.2009.0295.focus.
11. **Pendar M.-R., Pascoa J.C.** Numerical modelling of the distribution of virus carrying saliva droplets during sneeze and cough. *Physics of Fluids*. 2020; 32(8):0018432. DOI:10.1063/5.0018432.
12. **Feng Y., Marchal T., Sperry T., Yi H.** Influence of wind and relative humidity on the social distancing effectiveness to prevent COVID-19 airborne transmission: A numerical study. *Journal of Aerosol Science*. 2020; (147):105585. DOI:10.1016/j.jaerosci.2020.105585.8.
13. **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.
14. **De-Leon H., Pederiva F.** Particle modelling of the spreading of coronavirus disease (COVID-19). *Physics of Fluids*. 2020; 32(8):087113. DOI:10.1063/5.0020565.
15. **Litvintsev K.Yu., Kirik E.S., Dekterev A.A., Harlamov E.B., Malyshev A.V., Popel E.V.** Design-analytical program complex “SIGMA PB” for modelling of fire growth and evacuation. *Pozharnaya bezopasnost’*. 2016; (4):51–59. (In Russ.)
16. **Menter F.R.** Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA Paper*. 1993; (93):2906. DOI:10.2514/6.1993-2906.
17. **Zaichik L.I., Drobyshevsky N.I., Filippov A.S., Mukin R.V., Strizhov V.F.** A diffusion-inertia model for predicting dispersion and deposition of low-inertia particles in turbulent flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010; 53(1–3):154–162. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.044.
18. **Kirik E., Malyshev A., Vitova T., Popel E., Kharlamov E.** Pedestrian movement simulation for stadiums design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456(1):012074. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012074.
19. **Kirik E., Malyshev A.** Computer simulation of pedestrian flows for Universiade 2019 sport facilities versus hand calculations. *Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics 2016, Collective Dynamics*. 2016: 446–454. DOI:10.17815/CD.2016.11.