

УДК 57.087

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ТЕХНОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ

А.Р. Каримов¹, М.А. Соломатин^{1,*}

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409, Россия

*e-mail: mis4455@yandex.ru

Поступила в редакцию: 18.12.2023

После доработки: 22.01.2024

Принята к публикации: 06.02.2024

В работе обсуждается динамика аэрозолей в приложении к распространению воздушно-капельных вирусных инфекций в условиях, когда следует учитывать взаимное движение исследуемых объектов. Данная особенность наиболее сильно должна проявляться в городских условиях, где разнообразные транспортные потоки являются неотъемлемой частью среды обитания современного человека. Рассматривается движение отдельных частиц в двухмерной геометрии под действием силы тяжести и трения, а также внешнего электростатического поля. В рамках развиваемой модели исследуется влияние начальных условий, обусловленных физиологическими процессами дыхания, и состоянием окружающей среды на динамику распространения выдыхаемых аэрозолей. Произведена оценка расстояний, на которые могут распространиться аэрозольные частицы в зависимости от размеров и начальных скоростей частиц. Показано, что более крупные частицы распространяются на большие расстояния, тогда как более мелкие частицы «вморожены» в окружающую среду и могут распространяться только с потоками воздуха. В приложении к передаче вирусных инфекций это означает совершенно разные виды транспортировки вирусов в зависимости от размеров и вида дисперсной фазы. Полученные результаты были применены к анализу особенностей распространения вирусов в условиях метрополитена.

Ключевые слова: аэрозоль, сила Стокса, SARS-CoV-2.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.303

EDN NMDMSC

ВВЕДЕНИЕ

Распространение респираторных заболеваний зависит от множества факторов, включая транспортные потоки, которые являются неотъемлемой частью современной жизни человека и могут способствовать передаче вирусных инфекций. В настоящей работе обсуждается влияние взаимного движения людей на передачу различных вирусных инфекций, включая COVID-19.

Переносчиком большинства инфекций, включая коронавирусы, является твердая или жидкая фаза воздушного потока, возникающего при дыхании или кашле [1–3]. Это связано с тем, что характерные размеры дисперсной фазы могут меняться от микроскопических (10^{-9} м) до макроскопических (10^{-4} м) масштабов [4–6], тогда как размер вирусов лежит в диапазоне от 10^{-8} до $4 \cdot 10^{-7}$ м [7], т.е. достаточно крупные дисперсные частицы могут быть носителями достаточно большого числа вирусов. С другой стороны, более мелкие частицы должны достаточно быстро тормозиться силой трения, и

дальнейшее их распространение будет определяться собственными процессами переноса в окружающей атмосфере и действующими на них полями, а именно гравитационным полем Земли и внешними электростатическими полями, если система аэрозоль-вирус имеет дипольный момент.

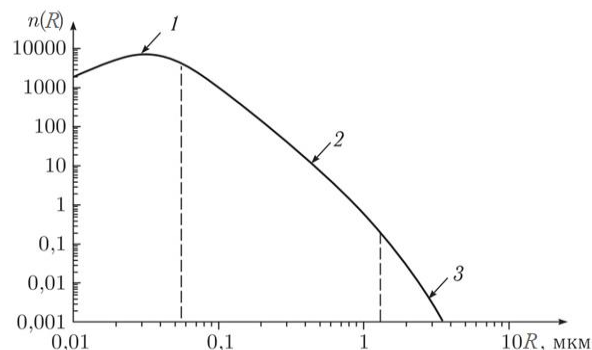


Рис. 1. Распределение аэрозольных частиц в атмосфере: 1 – частицы Эйткена; 2 – частицы Юнге; 3 – гигантские частицы [5, 6]

Говоря другими словами, при анализе распространения вирусов аэрозолями следует при-

нимать во внимание распределение частиц по размерам, а также их дипольные моменты.

Типичное распределение атмосферных аэрозолей представлено на рис. 1 [5, 6]. Как видно из графика, пик концентрации наблюдается для частиц между 10^{-8} и 10^{-6} м. При этом поражающий эффект будет зависеть от времени жизни на открытом воздухе и концентрации живых микроорганизмов во вдыхаемом воздухе [8–10], что напрямую определяется расстоянием до объекта поражения и скоростью вылетевшего аэрозоля, а значит, относительной скоростью людей. Например, наглядным примером такой ситуации, где необходимо учитывать относительную скорость людей, является взаимное движение людей на эскалаторах в метро.

Учитывая большую плотность людей и организацию людских потоков в современном городе, можно утверждать, что подобные факторы могут оказать значительное влияние на распространение вирусов в техногенных условиях. Поэтому для выявления роли размеров и начальных скоростей аэрозольных частиц, состояния окружающей среды было бы полезно проанализировать разлет дисперсной фазы в типичных условиях городской среды и обсудить влияние аэрозольной динамики на распространение вирусов.

В настоящей статье мы рассмотрим этот вопрос, используя простейшую двухмерную модель [9–13], описывающую динамику невзаимодействующих друг с другом аэрозольных частиц, движущихся только под действием силы тяжести и трения. Обсудим влияние начальных скоростей вылетающих частиц и их размеров на характер их разлета в пространстве (рис. 2), а значит, и на возможность распространения вирусов.

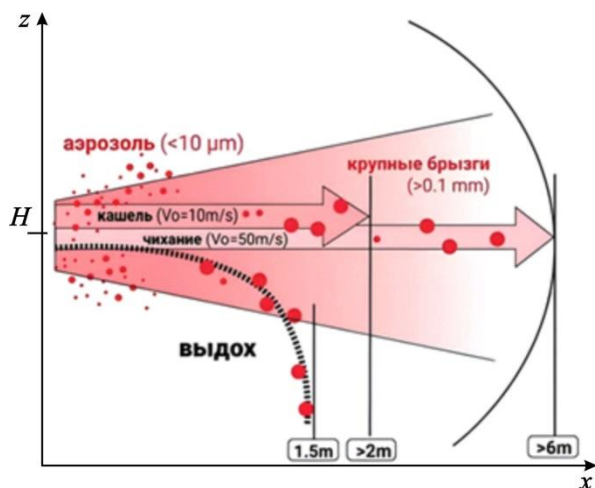


Рис. 2. Разлет дисперсной фазы при дыхательных процессах [8, 9]

Также данные результаты будут интересны с точки зрения определения соответствующих коэффициентов переходов в математических моделях распространения эпидемий, например, SEIR, SIR [14–16]. В настоящее время данные коэффициенты определяются из анализа эмпирической информации (см., например, [14, 17–19]), тогда как в рамках настоящей работы можно подойти к определению этих коэффициентов с теоретической стороны.

БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЕЙ

Чтобы наиболее простым образом учесть начальные условия, рассмотрим движение совокупности невзаимодействующих одинаковых частиц, имеющих сферическую форму, распространяющихся в воздухе с постоянной плотностью $\rho_{вз}$. Поскольку данные частицы отличаются только начальными кинематическими характеристиками, то для оценки основных характеристик разлета достаточно рассмотреть динамику одной частицы при разных начальных условиях. Ограничимся для простоты анализа движением частицы в двухмерной геометрии в плоскости XOZ , направив ось OZ от поверхности Земли, при этом ось OX лежит в плоскости параллельной поверхности Земли. Такая постановка задачи достаточно точно описывает струю выдыхаемого воздуха в сечении рта, как это показано на рис. 2. Другими словами, вместо граничной двухмерной задачи, где в сечении $x = 0$ заданы распределения скорости и плотности аэрозоля по высоте, рассмотрим начальную задачу о движении одной частицы, имеющей в начальный момент времени скорость (v_{x0}, v_{z0}) в точке $(x = 0, z = H)$. Также для упрощения анализа, положив $v_{x0} \gg v_{z0}$, ограничимся случаем, когда радиус дисперсной частицы R и ее характерная скорость (в обсуждаемом случае это v_{x0}) обеспечивают

$$Re = \rho_{вз} v_{x0} R / \eta \leq 1, \quad (1)$$

где η – коэффициент динамической вязкости воздуха.

Тогда сила трения определяется формулой Стокса $F_{тр} = -6\pi\eta Rv$, и динамика отдельной частицы описывается уравнениями:

$$\frac{dr}{dt} = v, \quad (2)$$

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = -6\pi\eta R(v - U) - mge_z + p\nabla \cdot E, \quad (3)$$

где $m = (4/3)\pi\rho_0 R^3$ – масса аэрозольной частицы, выраженная через плотность дисперсной фазы ρ_0 ; g – ускорение свободного падения, направленное в противоположную сторону $\mathbf{e}_z$ – орта оси OZ ; U – заданная скорость среды, в которой переносятся аэрозольные частицы; E – внешнее статическое электрическое поле; $\mathbf{p}$ – дипольный момент аэрозоля. В данном случае вкладом вирусов в массу аэрозольной частицы пренебрегаем.

В настоящей работе ограничимся рассмотрением простейшего случая, когда $U_x = \text{const}$ и $U_z = \text{const}$, а $\mathbf{E} = E(z)\mathbf{e}_z$ представляет собой собственное электрическое поле Земли. Для оценки величины $E(z)$ воспользуемся моделью «сферический конденсатор», в котором нижний электрод – поверхность Земли, а верхний электрод – верхние слои атмосферы. В нормальных условиях Земля имеет отрицательный заряд, причем, вблизи ее поверхности электрическое поле составляет $E_0 = 130$ В/м [20–22]. В отсутствие грозных облаков и т.д. напряженность электрического поля уменьшается с высотой и обращается в нуль на поверхности верхнего электрода. Для относительно небольшого высотного диапазона можем предположить, что разность плотностей ионов и электронов δn в практически нейтральной атмосфере постоянна. В этом случае распределение электрического поля определяется уравнением

$$\frac{dE}{dz} = 4\pi e \delta n \quad (4)$$

с граничным условием $E(z=0) = E_0$.

Решение данного уравнения есть

$$E = E_0 \left(1 - \frac{z}{L}\right), \quad (5)$$

где величина $L = |E_0|/(4\pi e \delta n)$ представляет собой эффективную высоту атмосферы в используемой модели конденсатора.

При этом следует иметь в виду, что дипольная капля может быть ориентирована параллельно или антипараллельно $\mathbf{E}$, испытывая воздействие в направлении дипольного момента. Положив для простоты $\mathbf{p} \sim qR\mathbf{e}_z$, где q – заряд капли, для электростатической силы, действующей на каплю, получим

$$F_z = \mp 4\pi q e \delta n R. \quad (6)$$

Используя это соотношение, удобно переписать уравнения (2) – (3) в скалярной форме:

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -\frac{(v_x - U_x)}{\tau}, \\ \frac{dx}{dt} = v_x, \\ \frac{dv_z}{dt} = -\frac{(v_z - U_z)}{\tau} - g \pm a, \\ \frac{dz}{dt} = v_z \end{cases} \quad (7)$$

при характерном времени торможения

$$\tau = \frac{2}{9} \frac{\rho_0 R^2}{\rho_{вз} \nu}, \quad (8)$$

где использовалась кинематическая вязкость, связанная с динамической вязкостью соотношением $\eta = \rho_{вз} \nu$, а величина

$$a = \frac{3qe\delta n}{\rho_0 R^2} \quad (9)$$

представляет собой ускорение капли в электростатическом поле. Поскольку интересующий нас пространственный диапазон здесь относительно невелик, можем предположить, что ускорение a остается постоянным. В результате, влияние заряда капли в нашей модели сводится просто к коррекции гравитационного ускорения. Однако, в зависимости от среды, диапазон a может быть довольно широким и включать случай $g \sim a$, когда проявляется сильное влияние электростатической составляющей ускорения капли. Такая ситуация может реализовываться, если заряд выдыхающего человека и локальное электрическое поле в окружающей среде будут увеличены в некоторых особых условиях, например, в лабораториях, фабриках, рядом с компьютерами и мобильными телефонами, а также во время грозы. Далее будем использовать эффективную гравитацию $g' \equiv g \pm a$, чтобы описать проявление электрической силы, которая может ослабить или даже доминировать над реальной гравитацией.

Решение системы уравнений (7) есть

$$v_x = (v_{x0} - U_x) \exp(-t/\tau) + U_x. \quad (10)$$

$$x(t) = U_x t + \tau(v_{x0} - U_x)[1 - \exp(-t/\tau)], \quad (11)$$

$$v_z(t) = (v_{z0} + \tau g - U_z) \exp(-t/\tau) + U_z - \tau g', \quad (12)$$

$$z(t) = H + \tau(v_{z0} + \tau g - U_z)[1 - \exp(-t/\tau)] \times [1 - \exp(-t/\tau)] + (U_z - \tau g')t. \quad (13)$$

Для того чтобы пояснить особенности динамики распространения вирусов, описываемой соотношениями (10)–(12), рассмотрим поведение аэрозоля на начальном промежутке $0 \leq$

$t < \tau$, где данные соотношения при учете только линейных по t/τ членов сводятся к

$$\begin{aligned} v_x(t) &= v_{x0} + (U_x - v_{x0}) \frac{t}{\tau}, \\ v_z(t) &= v_{z0} - tg' + (U_z - v_{z0}) \frac{t}{\tau}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$x(t) = tv_{x0}, \quad z(t) = H + tv_{z0} - g't^2/2. \quad (15)$$

Из соотношения (14) следует, что горизонтальная составляющая скорости аэрозоля изменяется от v_{x0} до скорости воздушного потока U_x , а вертикальная составляющая меняется от v_{z0} до $v_z = v_{z0} - \tau g'$. Поскольку при $t \sim \tau$ частица практически «забывает» всю информацию о своем начальном состоянии, дальнейшее ее распространение при $t > \tau$ определяется главным образом трением воздуха, эффективным гравитацией и скоростью фоновых воздуха.

При этом следует иметь в виду, что влияние электрического поля будет значимым только для небольших частиц. Действительно, аэрозоль может удерживаться электрическим полем, если

$$mg \leq 4\pi qe\delta n R, \quad (16)$$

откуда для сферической частицы получаем критический радиус

$$R_* = \sqrt{3 qe\delta n / \rho_0}, \quad (17)$$

т.е. можно пренебречь электрической левитацией для частиц с $R > R_*$.

Как видно из (15), горизонтальное смещение частицы в первом порядке по времени определяется в основном начальной скоростью выдыхаемого воздуха. К моменту $t = \tau$ частица проходит расстояние

$$L_x = \frac{2}{9} \frac{\rho_0}{\rho_{вз}} \frac{R^2}{v} v_{x0}, \quad (18)$$

так что более крупные капли могут распространяться на большее расстояние. Это связано с тем, что сила трения, тормозящая частицу, пропорциональна ее радиусу R , а масса пропорциональна R^3 . В результате у более тяжелой частицы будет менее отрицательное ускорение, т.е. она будет тормозиться более медленно, а значит, пролетит на большее расстояние (см. рис. 2). С другой стороны, если для простоты положить $v_{z0} = 0$, то при $t = \tau$ вертикальное смещение частицы составит

$$L_z = |z(t) - H| = \frac{1}{2} g' \tau^2 = \frac{2}{81} \frac{\rho_0^2}{\rho_{вз}^2} \frac{g' R^4}{v^2}, \quad (19)$$

т.е., как и следовало ожидать, более крупные частицы достигают поверхности Земли раньше

более мелких частиц. Как уже отмечалось, в зависимости от местных условий, электрическая сила может уменьшить или даже изменить знак эффективного гравитационного ускорения g' . Далее будем полагать $g' \equiv g$, понимая, что эффект электрического поля может быть учтен путем изменения масштаба и знака g' , т.е. путем изменения масштаба L_z .

На начальном этапе распространения аэрозолей в качестве соответствующих пространственных характеристик удобно использовать L_x и L_z . Как видно из (18) и (19), L_x и L_z значительно увеличиваются с ростом R . Поэтому ограничимся оценкой разлета наиболее крупных частиц $R \geq R_0$, где $R_0 = 10^{-9}$ м, используя далее R_0 в качестве характерного пространственного масштаба задачи о распространении аэрозольных частиц, являющихся носителями вирусов.

ВЛИЯНИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ УСЛОВИЙ НА ДИНАМИКУ АЭРОЗОЛЕЙ

В качестве примера использования данных соотношений, а также влияния техногенных условий на распространение вирусов воздушно-капельным путем, оценим динамику распространения аэрозолей в условиях метрополитена.

В основном физико-химические характеристики конденсированных частиц в выдыхаемом воздухе определяются физиологическими и патологическими процессами в респираторном тракте человека [8–12, 28], и, в зависимости от окружающих условий, из газовой фазы выдыхаемого воздуха происходит образование водного конденсата. При этом атмосферные аэрозольные частицы, включая вирусы, могут образовывать с такими каплями устойчивые соединения. Когда такие образования покидают организм, их жидкая фаза может испариться за достаточно короткое время. Например, согласно [29] время испарения водных аэрозольных частиц диаметром в несколько микрон составляет менее одной секунды. В результате останется только твердая фаза. Поэтому для грубых оценок имеет смысл рассматривать два предельных типа аэрозолей: жидкие капли, чья плотность близка к плотности воды при нормальных условиях (т.е. положим $\rho_0 = \rho_v = 997$ кг/м³), и твердые частицы, за характерную плотность которых возьмем плотность наиболее распространенного естественного аэрозоля – сажи (т.е. положим $\rho_0 = \rho_{сж} = 1800$ кг/м³).

Величины плотности и коэффициентов вязкости воздуха в температурном диапазоне от 0 до 20 °С приведены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость плотности и вязкости воздуха от температуры [23]

Температура, °С	$\rho_{\text{вз}},$ кг/м ³	$\eta \times 10^{-5},$ кг/(м · с)	$\nu \times 10^{-5},$ м ² /с
0	1.29	1.72	1.33
+ 20	1.21	1.81	1.51

Как видно из данной таблицы, в рассматриваемом диапазоне температур изменение плотности и кинематической вязкости несущественно, поэтому в оценках можно ограничиться рассмотрением только случая $T = 20$ °С.

В начальной скорости аэрозольной частицы v_{x0} выделим составляющую v_d , связанную с физиологией дыхания (скорость потока выдыхаемого воздуха относительно человека) и составляющую v_t , обусловленную движением исследуемого объекта, т.е. запишем

$$v_{x0} = v_d + v_t, \quad (20)$$

где v_d может меняться в пределах $3 \leq v_d \leq 12$ м/с; здесь нижний предел соответствует спокойному дыханию человека, а верхний предел – кашлю [24]. В рассматриваемом случае считается, что скорость аэрозольной частицы совпадает со скоростью выдыхаемого воздуха. При этом собственная скорость движения человека может меняться от $v_h = 3$ м/с при спокойной ходьбе до $v_h = 6$ м/с при беге. Кроме того, в v_t может входить скорость эскалатора, $v_e = 0.75$ м/с.

Используя R_0 в качестве характерного пространственного масштаба задачи, соотношения (8) и (12) удобно переписать в безразмерной форме:

$$l_x = \frac{2}{9} \frac{\rho_0}{\rho_{\text{вз}}} Re(R_0) r^2, \quad (21)$$

$$l_z = \frac{4}{81} \frac{\rho_0^2 R_0}{\rho_{\text{вз}}^2 L_*} r^4. \quad (22)$$

здесь $l_x = L_x/R_0$, $l_z = L_z/R_0$, $r = R/R_0$ и $L_* = \nu^2/gR_0^2$, а число Рейнольдса определено по R_0 , т.е. $Re(R_0) = R_0 v_{x0}/\nu$.

Как видно из данных соотношений, характерные расстояния l_x и l_z для твердых аэрозолей превышают аналогичные размеры жидких аэрозолей в $\kappa = \rho_{\text{сж}}/\rho_{\text{в}}$ и κ^2 раз соответственно.

На рис. 3 приведена зависимость l_x от размера капли для трех характерных значений Re , полученных при $v_{x0} = 3, 6, 12$ м/с соответственно. Данные кривые описывают разлет аэрозолей от спокойно дышащего, неподвижного человека ($Re = 0.2$) до кашляющего или относительно спокойно дышащего, но бегущего человека ($Re = 0.8$). Как видно из приведенных зависимостей, во всех режимах частицы размером $R \leq 40$ мкм распространяются на расстояние не более $L_x = 0.2$ м. Наибольшую опасность представляют крупные частицы, имеющие размер $R \sim 100$ мкм и более, когда даже от спокойно дышащего идвигающегося шагом человека (кривая 2) аэрозоли распространяются на расстояние $L_x \geq 0.5$ м, которое устанавливается за время порядка τ . Например, для частиц с $R = 100$ мкм согласно (5) получаем $\tau = 0.1$ с, т.е. в большинстве повседневных случаев, представляющих потенциальную опасность переноса вирусных заболеваний воздушно-капельным путем, можно пренебречь временем установления τ . Такая ситуация может возникнуть, например, в зоне заражения на переполненных эскалаторах метро, где могут оказаться десятки людей. Если $L_x \geq 2$ м, а такой случай может возникнуть для крупных частиц, распространяющихся от бегущего человека, у которого к тому же скорость выдоха $v_d \sim 10$ м/с, то в зону поражения могут также попасть люди, находящиеся на соседней лестнице. Из этого следует необходимость ограничения скорости передвижения пассажиров, находящихся на эскалаторе.

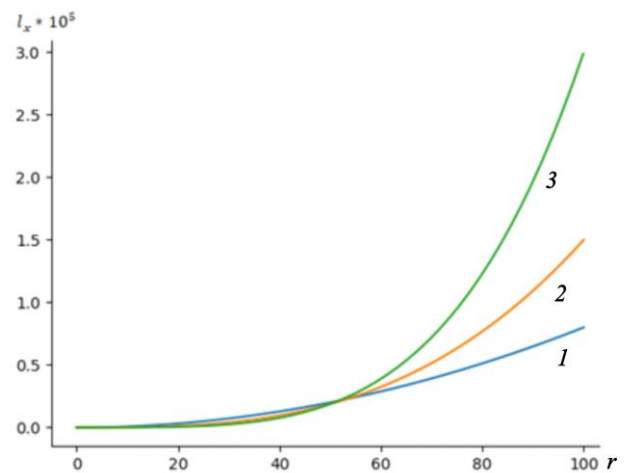


Рис. 3. Зависимость $l_x = L_x/R_0$ от размера частиц $r = R/R_0$ (здесь и далее $R_0 = 1$ нм), определяемая соотношением (21), при $Re = 0.2$ (кривая 1), $Re = 0.4$ (кривая 2) и $Re = 0.8$ (кривая 3) для жидких фракций аэрозолей

При этом микрочастицы размером до 5 мкм легко проходят через дыхательные пути человека и проникают в альвеолы, тогда как капли размером более 10 мкм преимущественно задерживаются в верхних дыхательных путях и бронхах [25]. Хотя капли $R \gg 10$ мкм не представляют непосредственной опасности для пострадавшего, тем не менее, они могут находиться в выдыхаемом воздухе при кашле и чихании и распадаться на более мелкие.

В целом подобная динамика прослеживается и с твердыми аэрозольными частицами (рис. 4). Правда, в этом случае за счет большей плотности они могут распространяться на существенно большие расстояния, для выбранной плотности $\rho_{сж}$ характерная величина L_x примерно в 2 раза превышает аналогичную длину жидкого аэрозоля. При этом, в отличие от жидких капель, твердые аэрозоли не распадаются на более мелкие, и поэтому механизм их распространения не может измениться. Но в любом случае, вне человеческого тела мелкие жидкие и твердые частицы микрометрового диапазона будут оседать медленно и могут пассивно распространяться на большие расстояния за счет конвективного переноса. Чтобы прояснить этот момент, рассмотрим вертикальное движение аэрозольных частиц.

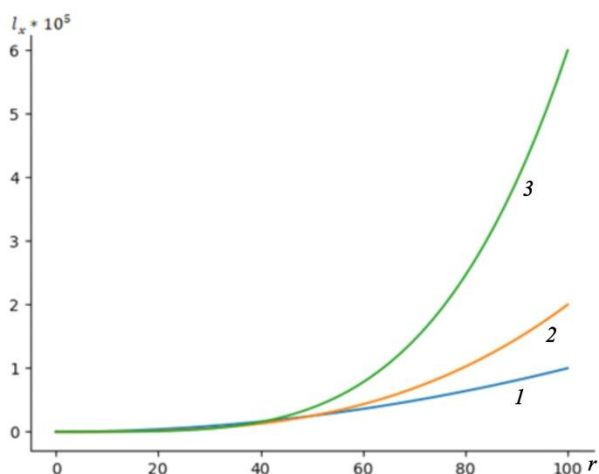


Рис. 4. Зависимость $l_x = L_x/R_0$ от размера частиц $r = R/R_0$, определяемая соотношением (21), при $Re = 0.2$ (кривая 1), $Re = 0.4$ (кривая 2) и $Re = 0.8$ (кривая 3) для твердых фракций аэрозолей

На рис. 5 представлены зависимости характерного вертикального смещения l_z от размеров аэрозоля r для твердой и жидкой фракции. Из данных графиков видно, что вплоть до $r \sim 40$ жидкие и твердые аэрозоли за время порядка $t \sim \tau$ смещаются одинаково на ничтожно малое расстояние. Основные отличия наблюдаются в

области $r \sim 100$. Так, за время $t \sim \tau$ крупные капли с $R \sim 100$ мкм смещаются по вертикали на $l_z \sim 10$ см, а твердые частицы такой же величины – на 175 см, тогда как жидкие аэрозоли с $R < 20$ мкм за это время падают всего на $l_z \sim 10$ мкм. Несмотря на малое горизонтальное смещение маленьких частиц, они остаются во взвешенном состоянии в воздухе в течение длительного времени. Такие частицы могут разноситься воздушными потоками, например, вентиляционными потоками в метрополитене, а также на них может сильно влиять локальное изменение электрического поля. Как видно из (15), $l_z \propto g'$, а поскольку g' в зависимости от q и E может меняться в широком диапазоне, то и l_z также имеет широкий диапазон, что указывает на важность учета внешнего электрического поля и необходимость организации соответствующей вытяжной вентиляции как на уровне стоящих, так сидящих пассажиров в вагонах метрополитена.

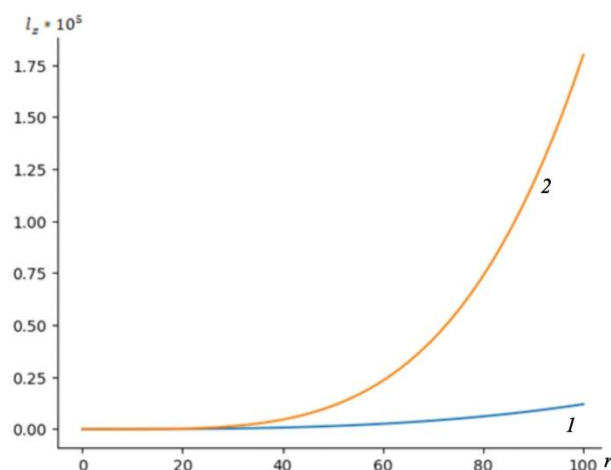


Рис. 5. Зависимость $l_z = L_z/R_0$ от размера частиц $r = R/R_0$, определяемая соотношением (22), для жидких фракций (кривая 1) и твердых фракций аэрозолей (кривая 2)

Более того, последние исследования вирусов [26, 27] SARS-CoV-2 показали, что данный вирус имеет строение, напоминающее структуру двойного электрического слоя (рис. 6). Учитывая особенности строения вирусов SARS-CoV-2, содержащего заряженные области, можно ожидать, что при определенных условиях система аэрозоль-вирус будет обладать огромным дипольным моментом, а значит, электростатическая часть ускорения g' будет определять динамику аэрозолей.

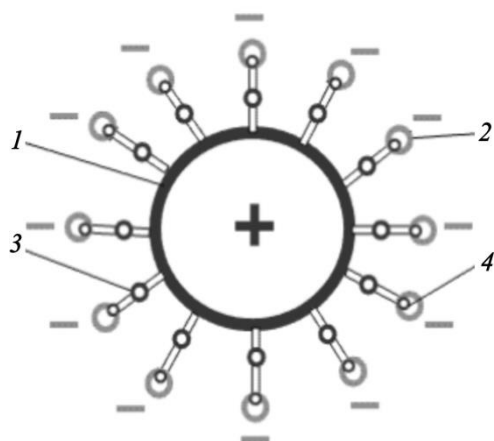


Рис. 6. Расположение электрически заряженных участков на поверхности коронавируса SARS-CoV-2: 1 – электрически заряженная +РНК вируса; 2 – электрически заряженные пепломеры; 3 – положительно заряженные участки белка; 4 – положительно заряженные участки на RBD SARS-CoV-2 [26]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследовалось влияние начальных условий (размеров, дипольных моментов и начальных скоростей аэрозольных частиц, состояния окружающей среды) на динамику разлета частиц при малых скоростях под действием сил тяжести, внешних электрических полей и трения в приложении к распространению вирусных заболеваний, передающихся воздушно-капельным путем (например, SARS-CoV-2). При записи силы трения использовалась формула Стокса, справедливая при $Re < 1$, что накладывало естественные ограничения на масштабы рассматриваемых процессов. Все сделанные оценки следует трактовать как предварительные, поскольку в работе не обсуждалось распределение плотности аэрозоля по пространству и во времени, что является основным показателем распространения вирусов. Кроме того, поскольку капли могут сливаться или распадаться, а также конденсироваться или испаряться с течением времени, на них влияют локальные (обычно турбулентные в таких небольших масштабах) воздушные потоки, а более крупные аэрозольные частицы с большими дипольными моментами могут легко накапливать влагу из окружающего воздуха. Поэтому остаются вопросы, связанные с выживанием захваченных вирусов, а также как собственные поля электрических зарядов внутри как жидкого, так и твердого аэрозоля (если они существуют в виде системы аэрозоль-вирус) влияют на распространение и время жизни вируса.

При этом ключевым моментом является величина начальной скорости вылетающих частиц, определяемая физиологическими особенностями дыхания, поскольку данный фактор определяет допустимое расстояние L_x , на которое может пролететь частица, являющаяся переносчиком вирусов. Как следует из соотношений (12) и (13), более крупные частицы распространяются на большие расстояния, тогда как более мелкие частицы (см. рис. 3, 4, 5) по сути «вморожены» в окружающую среду и могут распространяться только с потоками воздуха. В результате со временем возможно их накопление в помещении, что может привести к непрямому инфицированию, даже если инфицированный человек более не находится в помещении. Отдельно стоит отметить, что твердые аэрозоли за счет большей плотности имеют значительно большее допустимое расстояние распространения. К тому же, крупные частицы ($R \sim 100$ мкм), обладая большей поверхностью, могут переносить большее число вирусов.

Более того, в случае заряженных аэрозолей при наличии неоднородных внешних электростатических полей, например естественного поля Земли, большую роль в процессах переноса начинает играть электростатическая часть ускорения g' , которая при определенных условиях может определять направление и расстояние распространения аэрозольной частицы. В приложении к передаче вирусных инфекций это означает совершенно разные виды транспортировки вирусов в зависимости от размеров и вида дисперсной фазы, что должно определять соответствующие способы борьбы с ними в зависимости от организации транспортных потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scharfman B.E., Techet A.H., Bush J.W.M., Bourouiba L. Visualization of sneeze ejecta: steps of fluid fragmentation leading to respiratory droplets // *Experiments in Fluids*, 2016. V. 57. P. 24.
2. Alsved M., Bourouiba L., Duchaine C., et al. Natural sources and experimental generation of bioaerosols: Challenges and perspectives // *Aerosol Science and Technology*, 2019. V. 54. Pp. 547–571.
3. Grinshpun S.A., Clark J.M. Measurement and characterization of bioaerosols // *Journal of Aerosol Science*, 2005. V. 36. P. 553.
4. Kondratyev K.Y., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotos C.A. *Atmospheric Aerosol Properties: Formation, Processes and Impacts*. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 572 p.
5. Пискунов В.Н. Динамика аэрозолей. М.: Физматлит, 2010. 293 с.

6. Ivlev L.S. Atmospheric aerosols. Aerosols – Science and Technology / I. Agranovski ed. Wienheim: Wiley – VCH, 2010. 345 p.
7. Филдс Б.Н., Найн Д.М., Мэрфи Ф.А., Харрисон С. Вирусология. М.: Мир, 1989. Т. 3. 492 с.
8. Huang S. COVID-19. Why we should all wear masks-There is new scientific rationale. [Электронный ресурс]. URL: <https://medium.com/@Cancerwarrior/covid-19-why-we-should-all-wear-masks-there-is-new-scientific-rationale-280e08ceee71> (дата обращения 10.11.2023)
9. Брусина Е.Б., Чезганова Е.А., Дроздова О.М. Аэрогенный механизм передачи больничных патогенов // Фундаментальная и клиническая медицина, 2020. Т. 5. С. 97.
10. Bourouiba L. The fluid dynamics of disease transmission // Annual Review of Fluid Mechanics, 2021. V. 53. P. 473.
11. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1955. 351 с.
12. Karimov A.R., Stenflo L., Yu M.Y. Dynamics of charged aerosols relevant to transmission of airborne infections // Physica Scripta, 2022. V. 97. P. 085007.
13. Архипов В.А., Усанина А.С. Движение аэрозольных частиц в потоке. Томск: Издательский Дом ТГУ, 2013. 252 с.
14. Wang Z., Bauch C.T., Bhattacharyya S., d'Onofrio A., et al. Statistical physics of vaccination // Physics Reports, 2016. V. 664. P. 1–113.
15. Malchow H., Petrovskii S.V., Venturino E. Spatiotemporal patterns in ecology and epidemiology: theory, models, and simulation. Chapman @Hall / CRC Press, Boca Ration, 2007. 464 p.
16. Братусь А.С., Новожилов А.С., Платонов А.П. Динамические системы и модели биологии. М.: Физматлит, 2010. 400 с.
17. Kabanikhin S. I., Krivorotko O. I. Mathematical modeling of the Wuhan COVID-2019 epidemic and inverse problems // Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2020. V. 60. P. 1889–1899.
18. Ghosh K., Ghosh A.K. Study of COVID-19 epidemiological evolution in India with a multi-wave SIR model // Nonlinear Dynamics, 2022. V. 109. P. 47–55.
19. Leonov A., Nagornov O., Tyuflyin S. Modeling of Mechanisms of Wave Formation for COVID-19 Epidemic // Mathematics, 2022. V. 11. № 1. P. 167.
20. Israel H. Atmospheric electricity. Jerusalem: Keter Press, 1973.
21. Смирнов Б. М. Электрический цикл в земной атмосфере // Успехи физических наук, 2014. Т. 184(11). С. 1153–1176.
22. Williams E. The global electrical circuit: A review // Atmospheric Research, 2009. V. 91. Pp. 140–152.
23. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
24. Mahmoud S., Hosni M., Jones B., Shugart J.M., Hosni M.H., Mead K.R., et al. Transport and containment of infectious disease expelled by coughing in an aircraft cabin // ASHRAE Transactions, 2020. V. 126. P. 375.
25. Grippi M.A., Elias Jack A., Fishman Jay A., et al. Fishman's Pulmonary Diseases and Disorders. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
26. Clausen T.M., Sandoval D.R., Spliid C.B., Pihl J., Perret H.R., Painter C.D., et al. SARS-CoV-2 infection depends on cellular heparan sulfate and ACE2 // Cell, 2020. V. 183(4). Pp. 1043–1057.
27. Каплуненко В.Г., Косинов Н.В., Скальный А.В. Уязвимые электрически заряженные места SARS-CoV-2; электрическая модель вируса и роль микроэлементов в его инактивации // Микроэлементы в медицине, 2021. Т. 22. № 1. С. 3–20.
28. Климанов И.А., Соодаева С.К. Механизмы формирования конденсата выдыхаемого воздуха и маркеры оксидативного стресса при патологиях респираторного тракта // Пульмонология, 2009. № 2. С. 113–119.
29. Stadnytskyi V., Bax C.E., Bax A., Anfinrud P. The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission // Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020. V. 117(22). P. 11875–11877.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 1, pp. 30–39

PECULIARITIES OF DISTRIBUTION AEROSOL PARTICLES IN ANTHROPOGENIC CONDITIONS

A.R. Karimov¹, M.A. Solomatin^{1,*}

¹National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409, Russia

*e-mail: mis4455@yandex.ru

Received December 18, 2023; revised January 22, 2024; accepted February 6, 2024

The paper discusses the dynamics of aerosols as applied to the spread of airborne viral infections in conditions where the mutual movement of the objects under study should be taken into account. This feature should be most strongly manifested in urban environments, where various traffic flows are an integral part of the habitat of modern man. The movement of individual particles in two-dimensional geometry under the influence of gravity and friction,

as well as an external electrostatic field, is considered. Within the framework of the developed model, the influence of initial conditions determined by the physiological processes of respiration and the state of the environment on the dynamics of the spread of exhaled aerosols is studied. An assessment was made of the distances over which aerosol particles can spread depending on the size and initial velocities of the particles. Larger particles have been shown to travel longer distances. While smaller particles are «frozen» into the environment and can only spread with air currents. When applied to the transmission of viral infections, this means completely different types of virus transportation depending on the size and type of dispersed phase. The results obtained were applied to the analysis of the characteristics of spread for viruses in metro.

Keywords: an aerosol; Stokes' drag; SARS-CoV-2.

REFERENCES

1. Scharfman B.E., Tschet A.H., Bush J.W.M., Bourouiba L. Visualization of sneeze ejecta: steps of fluid fragmentation leading to respiratory droplets. Experiments in Fluids, 2016. Vol. 57. P. 24.
2. Alsved M., Bourouiba L., Duchaine C., et al. Natural sources and experimental generation of bioaerosols: Challenges and perspectives. Aerosol Science and Technology, 2019. Vol. 54. Pp. 547–571.
3. Grinshpun S.A., Clark J.M. Measurement and characterization of bioaerosols. Journal of Aerosol Science, 2005. Vol. 36. P. 553.
4. Kondratyev K.Y., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Atmospheric Aerosol Properties: Formation, Processes and Impacts. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 572 p.
5. Piskunov V.N. Dinamika aerorozlej [Aerosol dynamics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 293 p. [in Russian].
6. Ivlev L.S. Atmospheric aerosols. Aerosols – Science and Technology / Agranovski I. ed. Weinheim, Wiley – VCH, 2010. 345 p.
7. Filds B.N., Najp D.M., Merfi F.A., Harrison S. Virusologiya [Virology]. Moscow, Mir Publ., 1989. Vol. 3. 492 p. [in Russian].
8. Huang S. COVID-19. Why we should all wear masks-There is new scientific rationale. Available at: <https://medium.com/@Cancerwarrior/covid-19-why-we-should-all-wear-masks-there-is-new-scientific-rationale-280e08ceee71> (accessed 10.11.2023).
9. Brusina E.B., Chezganova E.A., Drozdova O.M. Aerogennyj mekhanizm peredachi bol'nichnyh patogenov [Aerogenic mechanism of transmission of hospital pathogens]. Fundamental'naya i klinicheskaya medicina, 2020. Vol. 5. P. 97 (in Russian).
10. Bourouiba L. The fluid dynamics of disease transmission. Annual Review of Fluid Mechanics, 2021. Vol. 53. P. 473.
11. Fuks N.A. Mekhanika aerorozlej [Aerosol mechanics]. Moscow, Izd-vo Akademii nauk SSSR Publ., 1955. 351 p. [in Russian].
12. Karimov A.R., Stenflo L., Yu M.Y. Dynamics of charged aerosols relevant to transmission of airborne infections. Physica Scripta, 2022. Vol. 97. P. 085007.
13. Arkhipov V.A., Usanina A.S. Dvizhenie aerorozol'nyh chastic v potoke. [Motion of aerosol particles in the flow]. Tomsk, Izdatel'skij Dom TGU Publ., 2013. 252 p. [in Russian].
14. Wang Z., Bauch C.T., Bhattacharyya, S., d'Onofrio A., et al. Statistical physics of vaccination Physics Reports 2016. Vol. 664. Pp. 1–113.
15. Malchow H., Petrovskii S.V., Venturino E. Spatiotemporal patterns in ecology and epidemiology: theory, models, and simulation. Chapman & Hall / CRC Press, Boca Raton, 2007. 464 p.
16. Bratus' A.S., Novozhilov A.S., Platonov A.P. Dinamicheskie sistemy i modeli biologii [Dynamic systems and models of biology]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 400 p. [in Russian].
17. Kabanikhin S.I., Krivorotko O.I. Mathematical modeling of the Wuhan COVID-2019 epidemic and inverse problems. Computational Mathematics and Mathematical Physics, 2020. Vol. 60. Pp. 1889–1899.
18. Ghosh K., Ghosh A.K. Study of COVID-19 epidemiological evolution in India with a multi-wave SIR model. Nonlinear Dynamics, 2022. Vol. 109. Pp. 47–55.
19. Leonov A., Nagornov O., Tyufin S. Modeling of Mechanisms of Wave Formation for COVID-19 Epidemic. Mathematics, 2022. Vol. 11. No. 1. P. 167.
20. Israel H. Atmospheric electricity. Jerusalem: Keter Press, 1973.
21. Smirnov B. M. Elektricheskij cikl v zemnoj atmosfere [The electric cycle in the Earth's atmosphere]. Uspekhi fizicheskikh nauk, 2014. Vol. 184(11). Pp. 1153–1176 (in Russian).
22. Williams E. The global electrical circuit: A review. Atmospheric Research, 2009. Vol. 91. Pp. 140–152.
23. Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostej [Reference book on thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 721 p. [in Russian].
24. Mahmoud S., Hosni M., Jones B., Shugart J.M., Hosni M.H., Mead K.R., et al. Transport and containment of infectious disease expelled by coughing in an aircraft cabin. ASHRAE Transactions, 2020. Vol. 126. P. 375.
25. Grippi M.A., Elias Jack A., Fishman Jay A., et al. Fishman's Pulmonary Diseases and Disorders. New York: McGraw-Hill Education, 2015.
26. Clausen T.M., Sandoval D.R., Spliid C.B., Pihl J., Perret H.R., Painter C.D., et al. SARS-CoV-2 infection depends on cellular heparan sulfate and ACE2. Cell, 2020. Vol. 183(4). Pp. 1043–1057.
27. Kaplunenko V.G., Kosinov N.V., Skaln'nyj A.V. Uyazvimye elektricheski zaryazhennye mesta SARS-CoV-2; elektricheskaya model' virusa i rol' mikroele-

mentov v ego inaktivacii [Vulnerable electrically charged areas of SARS-CoV-2; electrical model of the virus and the role of trace elements in its inactivation]. *Mikroelementy v medicine*, 2021. Vol. 22. No. 1. Pp. 3–20 (in Russian).

28. *Klimanov I.A., Soodaeva S.K.* Mekhanizmy formirovaniya kondensata vydyhaemogo vozduha i markery oksidativnogo stressa pri patologiyah respiratornogo trakta [Mechanisms of formation of exhaled air

condensate and markers of oxidative stress in pathologies of the respiratory tract]. *Pul'monologiya*, 2009. No. 2. Pp. 113–119 (in Russian).

29. *Stadnytskyi V., Bax C.E., Bax A., Anfinrud P.* The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020. Vol. 117(22). Pp. 11875–11877.