МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем бакалавр

«Аналітичне дослідження фізичних характеристик часової та просторової еволюції аерозолів – носіїв вірусу COVID-19»

Виконав: студент 4 курсу, групи НФ-43
Сень Б.В.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: Прикладна фізика енергетичних систем
Керівник: ст. викладач Віхтинська Т.Г.

Рецензент:

Харків – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій у фізико-енергетичних системах
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Руслан СУХОВ
підпис
"____" _____2020 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Сень Богдан Валерійович

1.Тема роботи «Аналітичне дослідження фізичних характеристик часової та просторової еволюції аерозолів – носіїв вірусу COVID-19» керівник роботи: Віхтинська Тетяна Геннадіївна, старший викладач,
затверджені наказом по університету від 29.04.2020 року № 0210-05/539.

2. Строк подання студентом роботи 06.06.2020

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1) дослідити основні фізичні механізми часової та просторової еволюції аерозолів та пилу в повітрі;

2) розглянути властивості інфекційної небезпеки біологічних аерозолів – носіїв вірусу COVID-19;

3) розробити аналітичну модель для опису часової та просторової еволюції аерозолів;

4) дослідити основні параметри часової та просторової еволюції аерозолів в різних зовнішніх умовах та властивостях аерозолів;

5) розробити рекомендації для зменшення інфекційної небезпеки під час епідемії COVID-19.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір і затвердження теми.
2	Робота над літературою та іншими джерелами
3	Написання вступу до роботи та першого розділу
4	Написання другого розділу
5	Написання третього розділу
6	Завершення написання дипломної роботи (висновки та література)
7	Подача науковому керівнику
8	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
9	Попередній захист
10	Захист

5. Дата видачі завдання

Студент _____ Богдан СЕНЬ

підпис

Керівник роботи _____ Тетяна ВІХТИНСЬКА

підпис

РЕФЕРАТ

Богдан Сень «Аналітичне дослідження фізичних характеристик часової та просторової еволюції аерозолів – носіїв вірусу COVID-19»

Кваліфікаційна робота бакалавра з прикладної фізики. – Х.: ХНУ імені В. Н.Каразіна, 2020. – 54 с.

У роботі розглянуто задачу зменшення інфекційної небезпеки під час епідемії Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) з точки зору фізичних характеристик просторової та часової еволюції біологічних аерозолів, які є носіями корона вірусу, або рухливості самих макромолекул цього вірусу. Для досягнення цієї мети у роботі проведено аналітичне дослідження змінення розподілу аерозолів – носіїв вірусу COVID-19, тобто досліджено основні фізичні механізми часової та просторової еволюції аерозолів та пилу в повітрі. В роботі побудовано фізико-математичну модель розглядуваних процесів, в основі якої лежить рівняння дифузії в полі тяжіння. Розв’язання цього рівняння дозволило здобути явні аналітичні вирази, які дають опис часової еволюції просторових початкових розподілів. Також проведено порівняння результатів роботи з результатами інших експериментальних робіт та досліджень, де проводилось комп’ютерне моделювання еволюції біологічних аерогелів. На заключному етапі роботи виходячи з результатів досліджень розроблено рекомендації для зменшення інфекційної небезпеки під час епідемії COVID-19.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АЕРОЗОЛЬ, РУХЛИВІСТЬ, СЕДИМЕНТАЦІЯ, ДИФУЗІЯ, ІНФЕКЦІЙНА НЕБЕЗПЕКА

РЕФЕРАТ

Богдан Сень «Аналитическое исследование физических характеристик временной и пространственной эволюции аэрозолей – носителей вируса COVID-19»

Квалификационная работа бакалавра прикладной физики. – Х.: ХНУ имени В. Н.Каразина, 2020. – 54 с.

В работе рассмотрена задача уменьшения инфекционной опасности во время эпидемии Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) с точки зрения физических характеристик пространственной и временной эволюции биологических аэрозолей, которые являются носителями коронавируса, или подвижности самих макромолекул этого вируса. Для достижения этой цели в работе проведено аналитическое исследование изменений распределения аэрозолей - носителей вируса COVID-19, то есть исследованы основные физические механизмы временной и пространственной эволюции аэрозолей и пыли в воздухе. В работе построена физико-математическую модель рассматриваемых процессов, в основе которой лежит уравнение диффузии в поле тяжести. Решение этого уравнения позволило получить явные аналитические выражения, которые дают описание временной эволюции пространственных начальных распределений. Также проведено сравнение результатов работы с результатами других экспериментальных работ и исследований, где проводилось компьютерное моделирование эволюции биологических аэрозолей. На заключительном этапе работы, исходя из результатов исследований, разработаны рекомендации для уменьшения инфекционной опасности во время эпидемии COVID-19.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АЭРОЗОЛЬ, ПОДВИЖНОСТЬ, СЕДИМЕНТАЦИЯ, ДИФФУЗИЯ, ИНФЕКЦИОННУЮ ОПАСНОСТЬ

ABSTRACT

Bogdan Sen "An analytical study of the physical characteristics of the temporal and spatial evolution of aerosols - carriers of the COVID-19 virus"
Qualification work of the bachelor of applied physics. – Kharkiv. – V.N. Karazin KhNU, 2020. – 54 p.

The paper considers the problem of reducing the infectious danger during the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) epidemic from the point of view of the physical characteristics of the spatial and temporal evolution of biological aerosols that are carriers of the coronavirus, or the mobility of the macromolecules of this virus itself. To achieve this aim, an analytical study of the distribution of aerosols - carriers of the COVID-19 virus was carried out, that is, the basic physical mechanisms of the temporal and spatial evolution of aerosols and dust in the air were studied. A physical and mathematical model of the processes under consideration is constructed, which is based on the diffusion equation in the gravitational field. The solution of this equation made it possible to obtain explicit analytical expressions that describe the temporal evolution of the spatial initial distributions. A comparison is also made of the results of work with the results of other experimental studies and studies, where computer modeling of the evolution of biological aerosols was carried out. At the final stage of the work, based on the results of studies, recommendations were developed to reduce the infectious danger during the COVID-19 epidemic.

KEYWORDS: AEROSOL, MOBILITY, SEDIMENTATION, DIFFUSION, INFECTIOUS DANGER

ЗМІСТ

ВСТУП ……...8

1. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕВОЛЮЦІЇ АЕРОЗОЛЕЙ ТА ПИЛУ В АТМОСФЕРИ (АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД)…….……..10

1.1. Проблема еволюції забруднень в атмосфері…….……10

1.2. Огляд методів розв’язку задач дифузії при наявності конвекції…….15

1.3. Приклад використання в практичних застосуваннях…….....19

1.4. Висновки розділу……..24

2. ПОСТАНОВКА ТА РОЗВ’ЯЗОК ДІФУЗІЙНОЇ ЗАДАЧИ З РЕЛАКСАЦІЇ БІОЛОГІЧНОГО АЕРОГЕЛЯ…….……...25

2.1. Основні рівняння задачі……..25

2.2. Розв’язання дифузійної задачі……27

2.3. Задача про седиментацію…….....29

2.4. Висновки розділу…….…30

3. ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДЛЯ РЕАЛЬНИХ УМОВ…….….31

3.1. Проблема інфекційної небезпеки розповсюдження COVID-19 в атмосфері……..……..……31

3.2. Фізичні аспекти розповсюдження COVID-19 в атмосфері……..……35

3.3. Розроблення рекомендації для зменшення інфекційної небезпеки під час епідемії COVID-19…….46

3.4. Висновки розділу……46

ВИСНОВКИ……...47

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……..48

ВСТУП

Актуальність теми. В даний час пандемія Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) охопила понад 212 країн і територій усього світу [1].

Однією з причин такого широкого розповсюдження є незвичайні властивості цього коронавірусу, як з точки зору інфікування, так і з точки зору поширення і передачі від людини до людини. Прямо зараз у багатьох країнах ведуться дослідження способів і характеристик поширення цього вірусу [2]. Ці дослідження ведуться як експериментальними методиками [3], так і методами математичного моделювання [4, 5]. Результатом таких досліджень, зокрема, вже стали вироблені інструкції щодо зменшення інфекційної безпеки, які прийняті ВООЗ [6]. При цьому, незважаючи на велику кількість результатів, багато висновків цих робіт не узгоджуються повністю між собою і вимагають подальшого вивчення.

Основною **метою** дипломній роботи є забезпечення зменшення інфекційної небезпеки під час епідемії COVID-19 з точки зору визначення фізичних характеристик просторової та часової еволюції біологічних аерозолів, які є носіями коронавірусу, або рухливості самих макромолекул цього вірусу.

Для досягнення поставленої мети визначені **задачі**:

– провести аналітичне дослідження змінення просторового розподілу аерозолів – носіїв вірусу COVID-19;

– дослідити основні фізичні механізми часової та просторової еволюції аерозолів та пилу в повітрі

– побудувати фізико-математичну модель розглядуваних процесів, в основі якої лежить рівняння дифузії в полі тяжіння.

– здобути явні аналітичні вирази, які дають опис часової еволюції просторових початкових розподілів.

– провести порівняння результатів роботи з результатами інших експериментальних робіт та досліджень, де проводилось комп'ютерне моделювання еволюції біологічних аерогелів.

– виходячи з результатів досліджень розробити рекомендації для зменшення інфекційної небезпеки під час епідемії COVID-19.

Об'єкт дослідження – інфекційна безпека під час епідемії COVID-19 з точки зору визначення фізичних характеристик носіїв вірусу.

Предмет дослідження – просторова та часова еволюція аерозолів – носіїв вірусу COVID-19.

Методи дослідження – аналітичні методи розв'язання задач дифузії аерозолів та пилу в атмосфері в полі тяжіння при відсутності і при наявності конвекції.

Наукова новизна одержаних результатів – аналітичні вирази, які дають опис просторової та часової еволюції біологічних аерозолів, що складаються з краплин різних розмірів.

Практичне значення отриманих результатів – практичні рекомендації для зменшення інфекційної небезпеки під час епідемії COVID-19.

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 54 сторінку, із них основного тексту 47 сторінки, 7 рисунків за текстом, список використаних джерел із 84 найменувань на 7 сторінках.

1. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕВОЛЮЦІЇ АЕРОЗОЛЕЙ ТА ПИЛУ В АТМОСФЕРИ (АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД)

1.1. Проблема еволюції забруднень в атмосфері

Перша теорія дифузії домішок в атмосфері була створена Г. І. Тейлором у 1915 р. [7] та Шмідтом у 1917 р. [8], які розглядували таке диференціальне рівняння:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{d}{dz}\left(K_z\frac{\partial C}{\partial z}\right) \quad (1.1)$$

Тут C — масова концентрація домішок; x, y, z — система прямокутних координат, у якій вісь X збігається з спрямуванням вітру, а вісь Z — вертикальна; u — швидкість вітру; K_x, K_y, K_z — коефіцієнти турбулентної дифузії у спрямуванні вісей X, Y, Z відповідно.

Це рівняння виражає закон збереження маси та засновано на припущенні про аналогію процесів молекулярної та турбулентної дифузії. Граничними умовами для рівняння (1.1) виявляються

$$\frac{C}{t} \le 0 = 0;\ \frac{C}{x^2} + y^2 + z^2 \to \infty = 0 \quad (1.2)$$

Для стаціонарного точкового джерела, розташованого в точці з координатами (0, 0, h), з постійними коефіцієнтами турбулентної дифузії та швидкості вітру, рішення має наступний вигляд:

$$C_{x,y,z} = \frac{M}{4\pi x\sqrt{K_y K_z}}\exp\left(-\frac{uy^2}{4K_y x}\right)\left\{\exp\left[-\frac{u(z-h)^2}{4K_z x}\right] + \exp\left[-\frac{u(z+h)^2}{4K_z x}\right]\right\} \quad (1.3)$$

Згідно рівняння (1.3) концентрація змінюється з відстанню згідно закону $C \sim x^{-1}$. Проте вже перші експериментальні дослідження атмосферної дифузії, здійснені до другої світової війни у Портоні (Англія), виявили якісні розходження з формулою (1.3). Так, згідно цих експериментів, концентрація

змінювалась по закону $C \sim x^{-1,8}$ [9]. Причиною таких розходжень виявляється якісна відмінність турбулентної дифузії від молекулярної. Коефіцієнти турбулентної дифузії не є постійними величинами, а залежать від розмірів хмари домішок, оскільки у кожен момент часу розсіювання хмари визначається в основному вихорами, спільномірними з ним по величині (див. А. Н. Колмогоров [10], А. М. Обухов[11]).

Задля отримання формул, які узгоджуються з експериментальними даними, до рівнянь почали задавати функціональні залежності для коефіцієнтів турбулентної дифузії.

У 1932 р. була опублікована робота О.Г. Сеттона[9], в якій викладена теорія розсіювання домішок, заснована на статистичній теорії турбулентності.

Використовуючи теорему Г. І. Тейлора [7] про поведінку частки в ізотропному турбулентному потоку та припускаючи, що розподіл концентрації в хмарі співпадає з нормальним розподілом Гаусса, О. Г. Сетон [9] отримав наступне рішення для стаціонарного крапкового джерела:

$$C_{x,y,z} = \frac{M}{\pi u x^{2-n} s_y s_z} exp\left\{-\left[\frac{y^2}{s_y^2 x^{2-n}} + \frac{z^2}{s_z^2 x^{2-n}}\right]\right\} \qquad (1.4)$$

де $S_{y,} S_z$ — «віртуальні коефіцієнти дифузії» у напрямку координатних вісей; n — число від 0 до 1, яке визначається профілем швидкості вітру.

Шляхом інтегрування рівняння (1.4) по *y* О.Г.Сетон [9] отримав рівняння для лінійного джерела нескінченно] або скінченної довжини.

Подальший розвиток теорії розсіювання йшов в основному двома напрямками:

рішення, отримані з рівняння турбулентної дифузії зі змінними коефіцієнтами, та рішення, отримані на засаді статистичної теорії.

Розглянемо спочатку перший напрямок, до якого відносяться роботи К. Л. Калдера [12], Д. Л. Лайхтмана [13], М. Е. Берлянда [14] та інші.

У 1963 р. М. Е. Берлянд [14] отримав рішення для крапкового джерела, розташованого на височині *H*. Задля приземної концентрації домішки з урахуванням часу усереднення це рішення має наступний вигляд:

$$C_{x,y,0} = \frac{M}{(1+m)K_1\varphi_0 x^2\sqrt{2\pi}} exp\left[-\frac{u_1 H^{1+m}}{K_1(1+m)^2 x} - \frac{y^2}{2\varphi_0^2 x^2}\right] \qquad (1.5)$$

де K_1, u_1 — значення коефіцієнта турбулентної дифузії та швидкості вітру на одиничній височині; φ_0 — дисперсія напрямку вітру*; m=n(2-n).*

У 1963 р. Д. Л. Лайхтман [13] запропонував описувати горизонтальне та вертикальне розсіювання різними рівняннями, а саме, горизонтальне розсіювання — рівнянням Гаусса, а вертикальне — полуемпіричним рівнянням турбулентної дифузії.

У 1973 р. Н. Л. Бизова [15] розробила методичний посібник з розрахунку розсіяння домішок, в основі якого лежить формула Д. Л. Лайхтмана.

Функціональні залежності [16, 12, 13, 15] для коефіцієнтів турбулентної дифузії мають обмежену область використовування [17]. З більш складними залежностями аналітичне рішення рівняння турбулентної дифузії (1.1) неможливе. Розвиток обчислювальної техніки дозволив отримувати чисельні рішення цього рівняння [18].

Теорія О. Г. Сеттона розвивалася як у роботах закордонних авторів — Х. Е. Крамера [19], Ф Пасквілла [20] та інших, та й вітчизняних — П. І. Андрєєва [21], Є. Н. Теверовського [22], А. Е. Хайкіної [23] та інших.

Більшість закордонних авторів [24] використовує наступну формулу для стаціонарного точкового джерела;

$$C_{x,y,z} = \frac{M}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\left\{exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\} \qquad (1.6)$$

де σ_y, σ_z — горизонтальна та вертикальна дисперсія розподілу домішки.

Задля розрахунку σ_y та σ_z використовують співвідношення $\sigma_y = Ax^a$; $\sigma_z = Bx^b$, де *A, a, B, b* — коефіцієнти, які залежать від стійкості атмосфери та шорсткості земної поверхні та які визначаються експериментально. Значення цих коефіцієнтів приводяться у роботах Т. Гілберта [25], Ц. В. Міллера [26] та інших. Формула (1.6) збігається з формулою О. Г. Сеттона (1.4) при $\sigma = \frac{S}{\sqrt{2}} x^{1-n/2}$.

Задля розрахунку концентрації від об'ємного джерела використовується приймання Холланда, тобто об'ємному джерелу приписуються початкові дисперсії σ_{y0} та σ_{z0}, створені «віртуальним» крапковим джерелом.

$$C_{x,y,0} = \frac{M}{\pi(\sigma_{y0} + \sigma_y)(\sigma_{z0} + \sigma_z)u} exp\left[-\frac{y^2}{2(\sigma_{y0} + \sigma_y)^2}\right] \times exp\left[-\frac{h^2}{2(\sigma_{z0} + \sigma_z)^2}\right] \quad (1.7)$$

У 1969 р. А. Е. Хайкіна [23] методом суперпозиції отримала формулу для розрахунку концентрації газової домішки, яка виділяється з вертикальних джерел прямокутної форми.

$$C_{x,y,z} = \frac{0{,}125M}{lbu}\left(erf\frac{y + l/2}{sx} - erf\frac{y - l/2}{sx}\right)\left(erf\frac{z - h}{sx} - erf\frac{z + h}{sx} + erf\frac{z + (h + b)}{sx} - erf\frac{z - (h + b)}{sx}\right) \quad (1.8)$$

де *l* — довжина джерела; *b* — його ширина, *h* — відстань від поверхні, що підстилає до нижнього боку джерела;

$$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$$

— інтеграл імовірності.

Діючі норми проектування засновані на методиці розрахунку Головної Географічної Обсерваторії (ГГО). Розрахункові формули отримані з рівняння (1.5) при знаходженні максимуму функції та впровадженні деяких інтерполяційних залежностей, отриманих на підставі статистичних даних

натурних обстежень. Формула задля розрахунку максимальної приземної концентрації газової домішки при викиду холодної газоповітряної суміші з джерела з круглим вістям має вигляд:

$$C_M = \frac{AMn}{h^{4/3}2\pi D\omega_0} \quad (1.9)$$

де *n* — безрозмірний коефіцієнт, значення котрого *n=1-3; D* — діаметр труби; ω_0 — швидкість викиду газоповітряної суміші; *A* — коефіцієнт, значення котрого для несприятливих метеорологічних умов в залежності від кліматичних зон складає 120–140.

Несприятливими метеорологічними умовами вважається поєднання небезпечної швидкості вітру з нестійкою стратифікацією атмосфери.

П. І. Андрєєв [21] отримав формулу задля максимальної концентрації, прийнявши у якості вихідної формулу О. Г. Сеттона

$$C'_M = \frac{30{,}6\varphi M\eta}{hD\omega_0} \quad (1.10)$$

де φ — множник, залежний від височини труби, значення котрого $\varphi = 1{,}15 - 1{,}95$; η — коефіцієнт, залежний від часу відбору проб. Для 30-хвилинного періоду, до якого відносяться максимальні разові концентрації η=0,4.

Порівняємо методику розрахунку ГГО з методикою А. І. Андрєєва. Задля цього поділимо рівняння (1.9) на рівняння (1.10).

Отримаємо:

$$C_{отн} = \frac{C_M}{C'_M} = \left(\frac{An}{61{,}2\pi\varphi\eta}\right)\frac{1}{h^{1/3}} \quad (1.11)$$

Як показує вираження (1.11) методики відрізняються чисельними коефіцієнтами та множником $h^{1/3}$. Задля кількісного зіставлення здійснені деякі розрахунки. Зіставлення результатів розрахунку максимальної концентрації домішки $C_{отн}$ згідно методам ГГО та П. І. Андрєєва приведені нижче:

Таблиця 1.1

Максимальна концентрації домішки

	h=20м	h=100м	h=200м
Мінімальне значення	0,5	0,22	0,16
Максимальне значення	3,0	1,32	0,96

Як видно з приведених даних, результати розрахунків максимальних концентрацій згідно цих двох методик знаходяться в однієї області до h=100 м включно.

1.2. Огляд методів розв'язку задач дифузії при наявності конвекції

Будинки та технологічне обладнання, розташовані на промисловому майданчику, деформують вітровий потік, змінюючи його швидкість та напрямок. В деформованому потоку розсіювання домішок підкоряється іншим закономірностям, ніж тим, що біли розглянені раніше, та безпосередньо пов'язане з характеристиками плину. Плин, що утворюється за твердим тілом, називають аеродинамічним слідом. Аеродинамічний слід поблизу тіла називають також аеродинамічною тінню. У зоні аеродинамічної тіні утворюється циркуляційний рух, лінії току котрого представляють собою замкнені криві.

У 1958 р. В. М. Ельтерман дослідним шляхом з використанням теорії розмірності отримав залежність для визначення максимальної концентрації шкідливої речовини під час викиду його у зону аеродинамічної тіні будівлі [27].

В. В. Поляков у 1971 р. [28] запропонував розглядати зону аеродинамічної тіні будівлі як замкнений об'єм, що має, за аналогією з приміщенням, що вентилюється, повітрообмін з оточуючим середовищем, кратність котрого визначалась експериментально. Визначивши в аеродинамічній тіні дві області, що відрізняються напрямком руху вихрових

потоків, він отримав залежності задля визначення середньої концентрації домішки в цих областях.

$$C_{\text{I}} = \frac{2M}{ulH} \tag{1.12}$$

$$C_{\text{II}} = B\frac{M}{u}\frac{l}{H^3} \tag{1.13}$$

де B — експериментальний коефіцієнт, залежний від співвідношення розмірів будівлі.

У 1961 р. С. І. Стріженов [29] задля визначення концентрації шкідливих речовин у міжцеховому просторі використовував наступні передумови:

концентрація в міжцеховому просторі постійна щільно до межі перемішування;

кут розкриття газового струменя складає 5%;

профіль швидкості потоку над будівлями співпадає з логарифмічним профілем плину уздовж гладкої поверхні.

Утворивши баланс кількості домішок, що забруднюють міжцеховий простір, він [23] одержав рішення;

$$C = \frac{14M}{slu} \tag{1.14}$$

де s — довжина джерела, м; l — відстань між будівлями.

Близькі до ідей С. І. Стріженова передумови отримали розвиток у роботах В. С. Нікітіна, В. Т. Самсонова та інш. [30]. Під час визначення кількості повітря, що провітрює зону аеродинамічної тіні будівлі автори використовували закономірності плоского вільного струменя. Нижньою межою струменя вважається лінія нульової швидкості, розташування котрої прийнято з експериментів. Запропоновані залежності можуть бути приведені до наступного загального вигляду:

для лінійних джерел

$$C = \frac{nmK_h M}{xlu} \tag{1.15}$$

для точкових джерел

$$C = \frac{mK_h M}{u}\left[\frac{H}{Pl} + \frac{42s}{(1{,}4l + x)^2}\right] \qquad (1.16)$$

де n — безрозмірний коефіцієнт, величина котрого залежить від типу будівлі та зони, в якій визначається концентрація; m, K_h — безрозмірні коефіцієнти занесення шкідливої речовини у циркуляційну зону, величина котрих залежить від міста розташування та височини джерела; p — величина, що характеризує розміри циркуляційної зони у напрямку руху вітру; s — безрозмірна величина, що характеризує зниження концентрації шкідливої речовини у точці, розташованій не на вісі джерела.

У 1977 р. опублікована робота В. П. Тітова та В. С. Тішкіна [31], в якій використана теорія О. Г. Сеттона задля випадку знаходження джерела у зоні аеродинамічної тіні. Концентрація домішки у зоні аеродинамічного сліду будівлі визначається як сума концентрацій від дійсного та фіктивного джерела, що направляє домішки назустріч вітру.

$$C_{x,y,z} = \frac{M}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\left\{exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\left[exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] + 2K\frac{\sigma_y\sigma_z}{\sigma_{1y}\sigma_{1z}}exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_{1y}^2}\right)exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_{1z}^2}\right)\right\} \qquad (1.17)$$

де K — коефіцієнт влучення домішок у зону аеродинамічного сліду; σ_{1y}, σ_{1z} — параметри інтенсивності процеса дифузії у зоні аеродинамічного сліду. Поза межами зони зворотного плину $\sigma_{1y}=\sigma_y$; $\sigma_{1z} = \sigma_z$.

Якщо K=0, формула (1.17) співпадає з формулою (1.6). У роботі М. Сміта пропонується наступна залежність:

$$C_{x,y,0} = \frac{M}{(\pi\sigma_y\sigma_z + AF)u}exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \qquad (1.18)$$

де A — безрозмірний коефіцієнт, залежний від форми будинку, рівний *0,5 – 1;* F — площа січення будинку, *м*^{2}.

В 1979 р. І. С. Патток та І. Ц. Р. Хант [32] отримали аналітичне рішення рівняння дифузії у випадку відривного плину при наступних передумовах:

поза зоною аеродинамічного сліду плин виявляється потенціальним;

у будь – якій крапці смуги, обмеженої нульовою лінією току концентрація однакова;

коефіцієнт турбулентної дифузії постійний в кожному поперечному перетину потоку.

Автори перейшли від фізичних координат *x, y* до координат *ψ, Ф*

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = -\frac{\partial \psi}{\partial y} \tag{1.19}$$

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{1.20}$$

де *u, v* — швидкості потоку відповідно у напрямку *x* та *y; ψ* — функція току*; Ф* — потенціал швидкості.

Зворотній перехід до координат *x, y* може бути виконаний, якщо відоме поле плину у найближчому сліді, котре автори визначають в результаті чисельного рішення рівняння Лапласа (поза зоною відриву) та згідно експериментальних даних.

У 1980 р. В. Т. Самсонов [33] припустив, що вплив повітряного потоку на концентрацію домішки можна врахувати, підібравши відповідну залежність задля узагальненого коефіцієнта дифузії *s.* Задавши нормальний закон розподілу домішки зі змінною дисперсією, він отримав наступне вираження:

$$C = \frac{M}{0{,}5u\sqrt{0{,}5s_y^2x^2 + B_\varphi^2 s_z x + L}}\varphi_0\left(\frac{y}{\sqrt{0{,}5s_y^2x^2 + B_\varphi^2}}\right) \times \left\{\varphi_0\left(\frac{z-h}{\frac{1}{\sqrt{2}}s_z x}\right)[1 + A(z-h)] + \varphi_0\left(\frac{z+h}{\frac{1}{\sqrt{2}}s_z x}\right)\right\} \tag{1.21}$$

де B_φ — параметр, який характеризує горизонтальне коливання вісі факелу, під час відхилення вітру від заданого напрямку; *L* — розхід повітря у викиду; *A* — комплексний множник; $\varphi_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$.

1.3. Приклад використання в практичних застосуваннях

Одним з прикладів забруднюючих домішок в атмосфері є радіоактивне забруднення. Моніторинг радіаційного забруднення довкілля здійснюватиметься взаимодоповнюючими методами моніторингу локалізованими на місцевості, що цікавить нас. Детектування проводитиметься як стаціонарно, так і мобільно, що дає даному проекту існувати у віддалених місцевостях незалежно від їх розташування.

Використовувані методи:
інтерференційний детектор на базі схеми Маха-Цендера з використанням оптоволокна, біоіндикаторний метод визначення радіаційного забруднення і важких металів, термолюмінесцентний дозиметричний метод детектування іонізуючого випромінювання на базі Al2O3, а також резистивні датчики на базі Si допірованним Cu.

Вище перераховані методи і детектори реєстрацій іонізуючого випромінювання знаходитимуться на локальній територій (далі званим островом) в разі стаціонарного розташування, а в разі мобільного моніторингу дані детектори розташовуватимуться на пересувному автотранспорті який зможе здійснювати моніторинг в on-line режимі. Відбір біологічних зразків вироблятиметься на місцевості, що вивчається, виученим персоналом.

На острові розташовані детектори реєстрації іонізаційного випромінювання і біологічні зразки - хвоя Ялини звичайної (Picea Abies (L.Karst), мох (Pleurozium schreber), лишайники (Hylocomium splendens). Островом є коло з діаметром 3 – 5 метрів, в центрі знаходяться фізичні детектори і устаткування, що додається, на поверхні зростають селективно вибрані біооб'єкти. Детектори острова представлені двома типами: енергоспоживаючі і нагромаджуючі, для забезпечення роботи енергоспоживаючих пристроїв залежно від місцевості використовуватимуться альтернативні джерела енергії.

До енергоспоживаючих приладів відносяться інтерференційний детектор і резистивний. Результати з цих приладів можуть бути передані за

допомогою GPS – прив'язки до місцевості або зібрані фахівцем, який обслуговує даний острів. До тих, що нагромаджують відносяться метод біоіндикації і термолюмінесцентний дозиметричний метод детектування іонізуючого випромінювання. Дані з накопичувальних приладів виходять при детальному аналізі в лабораторних умовах. Острови обслуговуються віддалено від радіоекологічного центру, в якому проходять випробування, обробка результатів і вчення персоналу.

У разі потреби існує мобільна група, яка проводить аналіз на місцевості. Дослідження по радіаційному моніторингу проводяться незалежною групою.

Потенційні замовники подібної реєстрації іонізуючого випромінювання можуть бути військові комплекси, підприємства ядерного паливного циклу і атомної промисловості, радіохімічні виробництва, регенераційні підприємства, також місця поховання ядерних відходів, наукові установи, лікувальні установи, організації цивільної оборони і надзвичайних ситуацій (ЦО і НС), а також даний метод може бути використаний для моніторингу радіаційного фону на території великих підприємств і промислових міст.

Подібні радіоекологічні центри з острівною мережею моніторингу місцевості не мають аналогів у вітчизняних і зарубіжних державах. Вирішення проблем дозволяє ефективно спостерігати за радіаційною обстановкою місцевості, оповістити отримані дані і давати рекомендації щодо поліпшення довкілля, а також створювати аналітичні банки даних для певного замовника.

У Японії користуються комп'ютерною системою SPEEDI. Комп'ютерна система SPEEDI розраховує територію поширення радіоактивних часток в разі витоку радіації на атомній станції, на основі вимірів, вироблених в різних крапках, з врахуванням переважаючої троянди вітрів і інших погодних умов. Дані, отримані за допомогою системи SPEEDI, можуть бути використані при складанні планів евакуації населення прилеглих до АЕС територій в разі аварії.

Проте побудовані вказаними дослідниками моделі мають загальний характер і вимагають уточнення стосовно конкретних умов. Крім того,

виникає необхідність апробації даних моделей на основі відомих даних екологічних і метеорологічних спостережень.

Таким чином, в даний час існує декілька методів розрахунку концентрації домішок від крапкових та лінійних джерел, розташованих поблизу будівель. Проте кожен з цих методів має обмежену область застосування. Актуальним завданням є створення універсального методу розрахунку, єдиного для різних типів джерел.

Вищеперелічені теорії розрахунку поширення радіоактивного пилу застосовні поза робочими приміщеннями АЕС, на територіях довкола станцій.

Такі ж методи, як адсорбція, абсорбція, криогенна дистиляція, мембранні методи, фільтрація, метод витримки, методи конверсії відносять до заходів щодо переробки і очищення радіоактивних відходів і викидів в межах робочих приміщень.

1.3.1. Витримка

Очищення скидань від деяких радіоактивних речовин включає витримку для природного розпаду радіоактивної домішки (протягом часу, порівнянного з десятьма періодами розпаду радіонукліда). Витримці піддають газ, що безпосередньо відходить, на протоці або в газгольдерах, або після попередньої підготовки: стискування, спалювання, розділення, а також в адсорбційних колонах.

1.3.2. Фільтрування.

Частки, що містяться в газах, надзвичайно всілякі по своєму складу, агрегатному стану, а також дисперсності. Очищення газів від зважених часток (аерозолів) досягається механічними і електричними засобами. Механічне очищення газів виробляють: дією відцентрової сили, фільтрацією крізь пористі матеріали, промиванням водою або ж іншою рідиною; інколи для звільнення від крупних часток використовують їх силу тяжіння. Також механічне очищення газів проводять методами сухої газоочистки (апарат циклон). Фільтрації і мокрої газоочистки. Електричне очищення газів застосовується для уловлювання високодисперсних часток пилу і забезпечує,

за відомих умов, високий коефіцієнт очищення. Осадження аерозолів здійснюється електричним полем високої напруги (до 50000 вольт), що викликає іонізацію газу; частки аерозолів отримують додатковий заряд і осідають на протилежно зарядженому електроді.

Розглянемо лише метод фільтрування.

На АЕС для видалення аерозолів (часток малого діаметру і крапель рідини) з вентиляційного повітря використовують тонковолоконниє фільтри.

Фільтрування – розділення суспензій або аерозолів за допомогою фільтрів – пористих перегородок (металевих, азбестових, скляних, та ін.), що пропускають рідину або газ, але затримують тверді частки.

Фільтрація – рух рідини або газу крізь пористе середовище, наприклад, просочування води крізь грунт підстави греблі. У промисловості часто фільтрацію називають фільтруванням.

Аерозолі – дисперсні системи, що складаються з дрібних твердих або рідких часток, зважених в газовому середовищі (зазвичай в повітрі). Аерозолі, дисперсна фаза яких складається з крапельок рідини, називається туманами, а в разі твердої дисперсної фази – димами; пил відносять до грубодисперсних. Розміри часток в аерозолях змінюються в дуже широких межах – від декількох міліметрів до 10^{-7} см.

Для фільтрації запилених газових потоків використовуються різні тканини з натуральних або штучних волокон (бавовна, шерсть, азбест, скловолокно, базальтове волокно, лавсан і ін.). Фільтри такого типа називаються тканинними (рукавними) фільтрами. Розміри обложених часток пилу в порах тканини і на її поверхні часто у багато разів менше середнього діаметру пір фільтрувальної тканини. Це пояснюється тим, що осадження часток в основному відбувається в результаті їх зіткнення з елементами тканини під дією сил інерції, електричних зарядів і інших чинників. Проте доки фільтр частково не забитий пилом, він мало ефективний по відношенню до дрібних часток. Тканинні фільтри служать для уловлювання вельми тонких фракцій пилу і мають високий коефіцієнт очищення.

Окрім тканинних, застосовуються фільтри із спеціального картону, пористого паперу, вати, пористої кераміки, металокераміки і ін. Конструкції їх вельми всілякі. Деякі з них не мають пристосувань для періодичного видалення пилу, і досягши певної величини гідравлічного опору матеріал, що фільтрує, замінюється. Видалення пилу з деяких фільтрів виробляється періодичним зворотним продуванням або промиванням, найчастіше водою. Для підвищення ефекту пиловловлювання фільтри з насадкою з крупних матеріалів (керамічних і металевих кілець, гофрованої сталевої сітки і ін.) змочують мінеральним маслом.

Промислові фільтри підрозділяються на апарати періодичної і безперервної дії, а також за ознакою напрямів руху фільтрату і дії сили тяжіння. Ці напрями можуть збігатися, бути протилежними або взаємно перпендикулярними.

1.3.3. Криогенна дистиляція.

У методі криогенної дистиляції, суміш газів, шляхом глибокого охолоджування, переводять в рідину, яку піддають дистиляції, тобто розгону на фракції. Після чого температуру підвищують і переводять рідини в гази.

1.3.4. Абсорбція. Абсорбція – один з випадків сорбції. На відміну від адсорбції, при абсорбції поглинання речовин відбувається у всьому об'ємі поглинача. Поглинання речовини може бути ускладнене хімічною взаємодією речовини, що поглинається, з поглиначем (хемосорбція).

По характеру поверхні зіткнення фаз абсорбери можна розділити на поверхневих, плівкових, барботажних і розпилюючих. Особливу групу складають механічні абсорбери, в яких розвиток поверхні зіткнення досягається дією деталей, що обертаються.

Типова схема рідинних способів очищення включає безперервну циркуляцію абсорбенту між апаратом, в якому відбувається очищення газу, і регенератором, в якому відбувається відновлення поглинювальної здатності розчину. У барботажних абсорберах газ розподіляється в рідині у вигляді бульбашок і струменів, на поверхні яких відбувається абсорбція. Найбільш

поширені абсорбери у вигляді колон з колпачковимі і ситчатимі тарілками. Газ проходить через шар рідини, рівень якої підтримується перелівнімі трубами. У плівкових абсорберах газ стикається з рідиною, рухомою у вигляді тонкої плівки. Найбільш поширені абсорбери насадок, що є колонами, завантаженими насадкою – твердими тілами різної форми (з кераміки, скла, фарфору і ін. матеріалів), по поверхні яких стікає рідина.

1.3.5. Адсорбція.

Адсорбція є концентрацією речовини (адсорбата, адсорбтіва) з об'єму фаз на поверхні розділу між ними, наприклад, з газу або розчину на поверхні твердого тіла (адсорбенту) або рідини. Адсорбція відбувається під впливом молекулярних сил поверхні адсорбенту і веде до зменшення вільної поверхневої енергії. Фізична адсорбція результат дії дисперсійних або електростатичних сил. При цьому молекули адсорбата зберігають свою індивідуальність. Якщо адсорбція супроводиться хімічною реакцією речовини, що поглинається, з адсорбентом, то вона називається хемосорбцією.

1.4. Висновки розділу

Таким чином, в даний час теорія дифузії домішок в атмосфері за відсутності перешкод розроблена достатньо повно. Незважаючи на різноманіття формул усі вони можуть бути отримані з одного диференціального рівняння (1.1) та приведені до подібного вигляду. Результати розрахунків по формулах співпадають за відповідного підбора експериментальних констант.

2. ПОСТАНОВКА ТА РОЗВ'ЯЗОК ДІФУЗІЙНОЇ ЗАДАЧИ З РЕЛАКСАЦІЇ БІОЛОГІЧНОГО АЕРОГЕЛЯ

Фізична сторона даної проблеми пов'язана з аналізом емісії поширення і поглинання забруднюючих речовин. Велика теоретична робота в цьому напрямі була проведена Берляндом. Задача про підвищення точності прогностичних оцінок радіаційних характеристик радіоактивного забруднення військової техніки, навколишнього середовища і дозових навантажень на персонал і населення входить до числа найважливіших завдань у сфері радіаційної безпеки. Тому, вирішення таких задач потребує вихідних рівнянь руху, що враховують поведінку частинок на всіх масштабах часів і відстаней. Такий підхід дозволяє провести послідовний висновок наближених рівнянь, які потім використовуються для вирішення конкретних завдань. При цьому повне врахування проведених наближень дозволяє оцінити точність отриманих результатів.

2.1. Основні рівняння задачі

Розглянемо пил, як систему зважених у повітрі часток, невзаємодіючих між собою. Тоді, рух окремо взятої частинки буде описуватися рівнянням Ланжевена [40]:

$$\mathrm{M}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{t}} = -\mathrm{bv} - \mathrm{Mg} + \rho_0 \mathrm{Vg} + \mathrm{f_{st}} \qquad (2.1)$$

Тут ми, для простоти, обмежуємося розглядом руху по вертикалі.

Перший доданок в (2.1) являє собою силу тертя, і коефіцієнт тертя b з одного боку пов'язаний з коефіцієнтом дифузії D за допомогою співвідношення Ейнштейна [29]:

$$D = \frac{k_B T}{b} \tag{2.2}$$

а, з іншого боку, для сферичних частинок визначається за формулою Стокса [29]:

$$b = 6\pi\eta R \tag{2.3}$$

де величина η - в'язкість повітря. Визначити величину коефіцієнта тертя можна за довідковими даними і згідно [30] він дорівнює b=2,85 10^{-6}R [кг/с].

Другий і третій доданки в (2.1) визначаються наявністю поля тяжіння, вони відповідають силі тяжіння і силі Архімеда. Величина $M = \rho V$ — маса частинки, $V = 4\pi R^3/3$ — об'єм, R — радіус, а ρ — щільність частинки; величина g = 9,8 *м/с*^{2} — прискорення вільного падіння поблизу поверхні Землі, а ρ_0 — щільність повітря.

Останній доданок описує внесок випадкових зіткнень молекул повітря з частинкою і представлений як випадкова сила.

Рівняння Ланжевена — рівняння руху макроскопічного тіла, що взаємодіє з частками термостата; їх вплив враховують за допомогою погодженого включення в рівняння сили тертя і випадкової зовнішньої сили. Якщо без врахування взаємодії з термостатом рівняння руху мало вигляд

$$md^2r/dt^2 + grad\, U(r,t) = 0, \tag{2.4}$$

де m — маса частки, U — потенційна енергія, то відповідне рівняння Ланжевена набуває форми

$$md^2r/dt^2 + h\, dr/dt + grad\, U(r,t) = F(t). \tag{2.5}$$

Рівняння (2.1) дозволяє вивести, так зване, рівняння Фоккера-Планка для функції розподілу частинок за швидкостями [31] $h = h(z, v)$:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v\frac{\partial h}{\partial z} - Mg\frac{\partial h}{\partial v} = \frac{b}{T}\frac{\partial}{\partial v}\left\{\frac{k_B T}{M} v\frac{\partial h}{\partial v} + h\right\} \tag{2.6}$$

Рівняння Фоккера – Планка — це рівняння для функції розподілу, що містить першу похідну за часом і диференціальний оператор (оператор Фоккера – Планка) другого порядку по координатах, імпульсах і т. п. Вперше отримане А. Ейнштейном в 1906 і М. Смолуховським (M. Smoluchowski) в 1913 при аналізі броунівського руху; пізніше А. Фоккер (A. Fokker) в 1914 і М. Планк (M. Planck) в 1917 отримали аналогічне рівняння в клас. і квантових теоріях обертання диполя в полі випромінювання, після чого рівняння стало називатися рівнянням Фоккера – Планка.

У теорії броунівського руху рівняння Фоккера – Планка записується для функції розподілу $f\ (r,\ p,\ t)$ значень координати r і імпульсу p броунівської частки з масою М в рідині або газі з температурою Т у вигляді

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{p}{M}\frac{\partial f}{\partial r} - \frac{\partial U}{\partial r}\frac{\partial f}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p}\xi\left(\frac{p}{M}f + kT\frac{\partial f}{\partial p}\right) \tag{2.7}$$

де U — потенціал зовнішньої сили ξ — коефіцієнт треніія, який Дж. Кирквуд (J. Kirkwood) представив у вигляді

$$\xi = \frac{1}{kT}\int_{-\infty}^{0} dt < \boldsymbol{FF}(t) > \tag{2.8}$$

де F — сила взаємодії броунівської частки з молекулами рідини (газу), <…> — усереднювання по фазовому простору рідини з рівноважною функцією розподілу Гіббса. Цей вираз має форму формули Кубо (1957), що виражає кінетичні коефіцієнти через тимчасові кореляції функції динамічних величин.

Рішення цього рівняння [29] в свою чергу дає повну картину еволюції пилу в полі тяжіння з урахуванням дифузії.

2.2. Розв’язання дифузійної задачі

Розглянемо задачу про седиментацію – осідання частинок пилу в газі під дією гравітаційного поля. З точки зору рівняння (2.4) можна виділити три відомих характерних типу еволюції. Для частинок великих розмірів (R> 100 мкм) не встигає відбуватися вихід на стаціонарний режим, і такі частинки

падають в полі тяжіння зі зростаючою швидкістю, але зі зменшуваним прискоренням.

Частинки менших розмірів (R < 100 *мкм*), для яких виконується нерівність, встигають вийти на стаціонарний режим падіння, тобто на режим руху з постійною швидкістю. Для таких частинок рішення рівняння (2.4) дозволяє вивести рівняння дифузії в полі тяжіння, так зване, рівняння Смолуховского [32]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D\frac{\partial}{\partial z}\left\{\frac{\partial n}{\partial z} + \frac{Mg}{k_B T}n\right\} \tag{2.9}$$

де $n=n(z)$ — кількість частинок в одиниці об’єму.

$$n(z) = \int h(v,z)dv \tag{2.10}$$

Рівняння (2.5) є основним рівнянням для розв’язання поставлених завдань, воно дозволяє з необхідністю ступенем точності визначати часову і просторову еволюцію систем частинок в зовнішніх полях. При цьому зручно переписати це рівняння в іншому вигляді:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D\frac{\partial^2 n}{\partial z^2} + c\frac{\partial n}{\partial z} = \frac{k_B T}{b}\frac{\partial^2 n}{\partial z^2} + \frac{Mg}{b}\frac{\partial n}{\partial z} \tag{2.11}$$

У такому вигляді в рівнянні явно виділені два доданка, які відповідають різним фізичним механізмам. Перший – це розмиття, за рахунок явища дифузії з характерним коефіцієнтом дифузії

$$D = k_B T/(6\pi\eta R) \tag{2.12}$$

Другий доданок описує так зване «знесення» (або «дрейф»), тобто спрямований рух за рахунок зовнішньої сили зі сталою швидкістю

$$c = \frac{Mg}{b} = \left(\frac{2}{9}\right) * (\rho R^2 g/\eta) \tag{2.13}$$

Еволюція системи частинок являє собою конкуренцію цих двох механізмів. При цьому відносний внесок кожного з механізмів визначається,

перш за все, розміром частинок. Так частки великих розмірів ($R > 1$ *мкм*) будуть з досить великою, але постійною швидкістю рухатися вниз, а частинки дуже маленьких розмірів будуть повільно дифундувати в атмосфері.

2.3. Задача про седиментацію

Розглянемо розв'язок типової задачі про еволюцію хмари радіоактивного пилу в полі тяжіння. Припустимо, що в початковий момент часу всі частинки знаходилися на деякій висоті z_0, тобто початкова умова має вигляд:

$$n(z, t = 0) = n_0 d\delta(z - z_0) \tag{2.14}$$

де d — товщина шару, n_0 — значення щільності в початковий момент часу, а $\delta(z)$ — функція Дірака.

Як граничну умову вибираємо вимогу рівності нулю потоку частинок на границі

$$j(z = 0, t) = D\frac{\partial n}{\partial z} + cn = 0 \tag{2.15}$$

Розв'язок цієї задачі [33] має такий вигляд:

$$n(z,t) = \frac{n_0}{2\sqrt{\pi Dt}}\left\{\exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{4Dt}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_0)^2}{4Dt}\right)\right\} \times \exp\left[-\frac{c}{2D}\left(z - z_0 + \frac{ct}{2}\right)\right] + \frac{cn_0 d}{2D}\exp\left(-\frac{cz}{D}\right) erfc\left(\frac{z - z_0 - ct}{\sqrt{4Dt}}\right) \tag{2.16}$$

де *erfc(x)* — інтеграл помилок.

Характерні залежності від висоти в певні моменти часу представлені на Рис. 2.1.

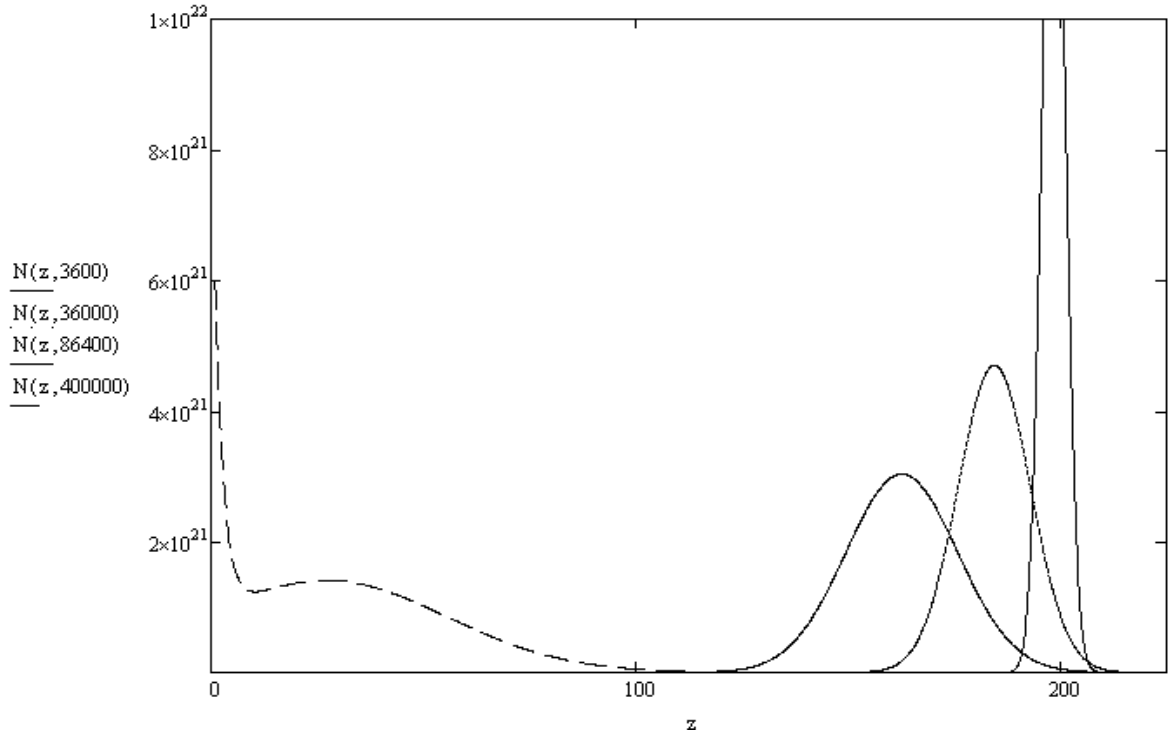


Рис.2.1. Приклад просторового розподілення в різні моменти часу.

2.4. Висновки

В результаті розв’язка поставленої задачі були визначені кількісні межі трьох режимів еволюції пилу або аерозолі в полі тяжіння. Були отримані рівняння, які дають опис еволюції частинок пилу довільних розмірів.

Основним висновком є той факт, що дезінфекцію територій, в яких є аерозолі, або дезактивацію територій, що забруднені радіоактивним пилом, необхідно проводити в кілька етапів. Якщо на першому етапі проводитися очищення поверхні, на яку швидко осіли частинки великих розмірів, то на другому етапі необхідно проводити очищення повітря від дуже дрібних частинок або краплинок, тим більше, що саме ці частки являють собою найбільшу небезпеку для дихальних шляхів.

3. ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДЛЯ РЕАЛЬНИХ УМОВ

Раптовий початок і широке поширення епідемії короніваруса призвело до появи великої кількості найрізноманітніших і часто суперечливих рекомендацій щодо забезпечення інфекційної безпеки.

Справа в тому, що COVID-19 є дійсно новим захворюванням [41] і багато його властивостей є невивченими. В даний час ведеться велика кількість досліджень по поширенню вірусу COVID-19 різними способами: від прямих експериментів до методів математичного моделювання. У цій роботі проводиться аналітичне розгляд проблеми поширення COVID-19 в атмосфері.

3.1. Проблема інфекційної небезпеки розповсюдження COVID-19 в атмосфері

Загальноприйнятим э той факт, що респіраторні вірусні інфекції (інфекції органів дихання) можуть поширюватися трьома основними способами [42]: контактним способом (шляхом прямого і непрямого контакту), респіраторними краплями (на короткі відстані) і за допомогою біологічного аерозолю (на великі відстані).

Респіраторними краплями називають краплі рідини розміром більше 5 мкм, а аерозоль складається з крапель меншого розміру (<5 мкм). Всі такі краплі біологічної рідини виникають в процесі кашлю, чхання або розмови носія інфекції. При цьому респіраторні краплі передають інфекцію, практично відразу потрапляючи на зовнішні об'єкти. Спосіб передачі інфекції за допомогою аерозольних крапель, називається повітряно-крапельним (airborne), і він обумовлений тим, що ці краплі досить довгий час знаходяться в повітрі, і можуть поширюватися на досить великі відстані [43].

Що стосується способів передачі SARS-CoV-2, то вони до кінця не вивчені [44]. Очевидно, що як і у випадку інших вірусних захворюваннях слід розрізняти розмір крапель; чим менше крапля, тим довше і далі вона може переміщатися в повітрі і тим більша ймовірність того, що вона не потрапить в

пастку слизу або війок і в підсумку досягне альвеол нижніх дихальних шляхів [45-50].

Прикладами вірусів, які, як відомо, поширюються через аерозолі, є вірус кору і вірус вітряної віспи [49, 51]. Вважається, що поширені респіраторні віруси грипу і респіраторно-синцитіальних вірус поширюються в основному краплями; проте, вважається, що також відбувається аерозольна передача [47-50, 52-54]. Поширення вірусу в дихальних шляхах під час спалаху важкого гострого респіраторного синдрому (ТОРС або SARS) (атипова пневмонія) в Китаї в 2003 році, як вважають, в основному відбувалося через респіраторні краплі [55]. Однак аерозольна поширення цього вірусу також фіксувалося [55-57].

Режим респіраторної (пов'язаної з органами дихання) передачі SARS-CoV-2 до кінця не вивчений. У дослідженні [58] було виявлено, що в експериментально згенерованих аерозольних частинках з SARS-CoV-2 виявлений вірус, життєздатний в клітинній культурі після трьох годин тестування. При цьому, треба враховувати, що результати інших досліджень показали, що лабораторні аерозолі можуть бути не зовсім аналогічними аерозолю, який видихається людиною. У зв'язку з цим так важливі експерименти з дослідження аерозолю у пацієнтів з інфекцією COVID-19. Наприклад, в Китаї аерозольні частинки були виділені з проб повітря, зібраних в різних місцях в двох лікарнях і на відкритій місцевості в місті Ухані. При цьому, вірусний геном був виявлений в деяких аерозолях, але в дуже низьких концентраціях [51].

Дослідження в іншій лікарні виявило РНК SARS-CoV-2 в 35% зразків аерозолю з відділення інтенсивної терапії і в 12,5% зразків, отриманих з відділення COVID-19 [59].

Епідеміологічний аналіз пройдений в Китаї показав, що випадки COVID-19, пов'язані з можливим впливом на торговий центр, могли статися за допомогою аерозолю [60]. У дослідженні, проведеному в Ірані, проби повітря, взяті з відривом від 2 до 5 м від ліжка пацієнта, були негативними для SARS-

CoV-2 RNA [61]. Однак дослідження, проведене в Медичному центрі Університету Небраски, продемонструвало наявність генома SARS-CoV-2 в 63,2% зразків повітря з кабінетів 11 пацієнтів, інфікованих COVID-19, причому деякі зразки були отримані на відстані великих 6 футів від пацієнта і в 66 , 7% з 12 проб повітря, отриманих з прихожих за межами кімнат пацієнтів [62].

Аналогічна спірна ситуація виникає і в питанні про доцільність використання масок. В установах по догляду за пацієнтами маски для обличчя використовувалися для захисту від організмів, які можуть передаватися дихальним шляхом, і використання масок в співтоваристві було рекомендовано для захисту від COVID-19 [63, 64]. Клінічні дослідження ефективності лицьових масок обмежені і важкі для проведення [65]. Аналіз досліджень, проведених серед працівників охорони здоров'я, показав, що під час епідемії SARS-CoV-1 в 2003 році, респіратори N95 і медичні маски значно знижували ризик для працівників охорони здоров'я [66]. Аналіз наступних досліджень, в яких порівнювали респіратори N95 з медичними масками не показав відмінностей між двома типами масок для запобігання декількох видів респіраторних захворювань [67]. В одному з досліджень, проведеному в Китаї, повідомлялося, що з 41 працівника охорони здоров'я (85% в хірургічній масці і 15% в масці N95), які перебували протягом більше 10 хв при на відстані менше 2 м від пацієнтів з SARS-CoV- 2, генеруючим аерозоль, жоден з них не захворів протягом наступних 14 днів.

При цьому слід задатися питанням, що невже так важливо, чи поширюється збудник через аерозоль більшу частину часу або просто час від часу?

Для відповіді на це питання було проведено поділ аерозольної передачі на три можливих види: повністю аерозольна, переважно аерозольна й умовно аерозольна. Вважається, що організми, які передають у вигляді повністю або переважно аерозолів, викликають інфекцію при попаданні в найглибші дихальні шляхи [68].

Умовно аерозольна передача може відбуватися, коли з'являється така можливість, але при цьому, інші шляхи, такі як контакт, краплі або проковтування, також можуть передавати інфекцію.

На великих відстанях передача крапель інфекції через повітря стає менш важливою, коли краплі падають на поверхню. У погано провітрюваних приміщеннях аерозолі можуть продовжувати відігравати важливу роль в передачі інфекції, оскільки вони залишаються в повітрі - і тому маска N95 бажана в зонах пацієнтів з COVID-19 - але в добре провітрюваних приміщеннях аерозолі можуть бути розведені в повітрі.

Вірусне навантаження, необхідна для зараження, невідома. Але наскільки далеко треба перебувати, щоб уникнути попадання крапель і аерозолі? Загальноприйнято, що краплі можуть переміщатися на 1-2 м до падіння на поверхні і що аерозолі можуть переміщатися набагато далі [69]

Медичні центри в США по контролю і профілактиці захворювань рекомендують, щоб люди витримували відстань в 6 футів [70]. Однак модель «газова хмара» передбачає, що кашель або чхання можуть привести до появи респіраторних частинок на відстані до 8 м [71].

Крім того, траєкторії руху повітряного потоку в кімнаті можуть істотно збільшити відстань, яке може пройти навіть крапля [72] У моделі рухомих людей, при ходьбі або бігу, відстань до видихуваних дихальних крапель може бути більше, ніж у вартих нерухомо [73].

Таким чином, в даний час немає остаточної згоди в питанні про просторової і тимчасової еволюції крапель параметрах еволюції крапель, що переносять вірус COVID-19. Для з'ясування цього питання ми розглянемо цю проблему з точки зору фізики.

3.2. Фізичні аспекти розповсюдження COVID-19 в атмосфері

Розглянемо розповсюдження COVID-19 в атмосфері з точки зору фізиці. Цей розгляд ініційовано епідемією SARS-CoV-2, яка стала основною проблемою суспільної охорони здоров'я в усьому світі, і ми сподіваємося, що здобуті в роботі результати дадуть конкретні рекомендації, щодо уповільнення поширення вірусу. В цьому підрозділі надамо огляд загрози зараження SARSCoV- 2 повітрям з фізичної точки зору.

3.2.1. Падіння в в’язкому середовищі

За наявності опору повітря малі важкі предмети швидко падають на землю, тоді як легкі предмети приймають участь у броунівському русі і рухаються практично разом з конвективними потоками повітря.

Для аерозольних частинок, що містять вірус, межа між цими двома типами поведінки залежить від розміру частинки. Почнемо з простого запитання: як довго вірус плаває в повітрі під впливом сили тяжіння [5].

На початку, проведемо дослідження руху в повітрі окремої макромолекулі вірусу з радіусом r = 90 нм, і масою m = 2,5 10^{-19} кг [75]. При цьому ми вважаємо, що ця сферична частинка знаходиться у в’язкій рідині (повітрі) в гравітаційному поле Землі.

Під дією сил гравітації частинки прагнуть впасти, але дифузія і конвекція призводять до гомогенізації - тобто прагнуть зробити їх розподіл однорідним по висоті, переміщаючи їх в області з більш низькою концентрацією. В цей же час механізм конвекції забезпечує макрозмішування всередині рідини (або газу) через те, що більш теплі, а, значить, більш легкі частини речовини прагнуть вгору, а більш холодні і щільні - рухаються через дії гравітації.

Під дією сили гравітації вірус рухається вниз з прискоренням, що зменшується, до тих пір, поки сила тяжіння не компенсує силою в'язкого тертя. Із закону Стокса для швидкості усталеного падіння маємо:

$$V_{вниз} = \mu M g \qquad (3.1)$$

де g = 9,8 м/с^2 – прикорення вільного падіння, та

$$\mu = \frac{1}{6\pi r \eta} \tag{3.2}$$

рухливість сферичної кулі з радіусом r в рідині або газі с в'язкістю η .

Для повітря для коефіцієнта динамічної в'язкості будемо використовувати оновленне значення [76]:

$$\eta = 1{,}8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м с)}. \tag{3.3}$$

З цих рівнянь знаходимо величину граничної швидкості падіння макромолекули вирусу

$$V = \frac{2}{9\eta} R^2 g = 8 \cdot 10^{-8} \text{ м / с}. \tag{3.3}$$

Таким чином, зрозуміло, що гравітація ні грає ніякої ролі в русі ізольованого вірусу скрізь повітря. Скорее движение вируса напоминает движения пахнущих веществ в воздухе за счет диффузии и конвекции.

Перейдемо тепер до розгляду руху в повітрі крапель рідин - носіїв коронавірусу. При цьому розглянемо і великі краплі, так і маленькі, що формують аерозоль. Масу крапель будемо знаходити по формулі

$$M = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho \text{ кг}, \tag{3.4}$$

де R – радіус краплини, а $\rho = 997$ кг/м^3 – густина біологічної рідини [5].

Великі краплі також можна розділити на дві категорії. Для перших з них, радіусом понад 1000 мкм, в'язким тертям об повітря можна знехтувати, і вони фактично падають по закону вільного падіння. Краплі розміром меншим 100 мкм, навпаки, рухаються практично з постійною швидкістю, яка визначається співвідношенням (3.1).

Тепер можна обчислити залежність часу падіння з висоти 2 м крапель різних характерних розмірів. Результати розрахунків наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Час падіння с висоти 2 м крапель різних розмірів

Радіус каплі, мкм	Час падіння с
> 500	0,663
50	6,63
5	663
0,5	66321

3.2.2. Вплив процесів випаровування

Результат попереднього розділу можуть істотно залежати від процесів випаровування крапель [77, 78]. У цій роботі було розраховано час випаровування крапель (при нормальних умовах). Порівнюючи ці розрахунки з часом падіння крапель, наведених у таблиці 3.1., Ми бачимо, що краплі розміром від 100 до 200 мкм падають як раз за такий час, за яке вони, випаровуючись, зменшуються до розмірів, характерних для аерозолю. Тобто в процесі випаровування їх рух припиняється через зменшення їх розмірів. **Таким чином, процеси випаровування великих крапель є ще одним фактором збільшення інфекційної небезпеки.**

3.2.3. Дифузне зменшення концентрації

Таким чином, ми визначили, що краплі досить малих розмірів досить довгий час можуть перебувати в повітрі. Однак навіть за відсутності конвекції концентрація таких крапель може зменшуватися за рахунок дифузного їх руху як броунівських часток в силу хаотичного рухів молекул повітря. Такий ефект буде визначатися температурою повітря, яка визначає середню кінетичну енергію молекул.

Коефіцієнт дифузії цих крапель можна визначити, використовуючи співвідношення Ейнштейна для зв'язку рухливості і коефіцієнта дифузії:

$$D = \mu k_B T \,. \qquad (3.5)$$

Тут k_B = 1,381 10^{-23} Дж/К – стала Больцмана.

Зі співвідношень (3.5) і (3.2) отримуємо відоме співвідношення Стокса-Ейнштейна

$$D = \frac{k_B T}{6\pi r \eta}. \qquad (3.6)$$

При використанні цього співвідношення для дуже малих крапель, і, тим більше, макромолекул треба пам'ятати про обмежений характер цього співвідношення. Наприклад, в [79], зокрема, вказується: «..., що використання макроскопічного наближення для опису молекулярних характеристик руху дає лише оціночні результати. У практичних додатках іноді використовують коефіцієнт 4 замість 6. Часто також припускають, що характерна для мікроскопічних рухів в'язкість нижче, ніж в'язкість, виміряна в макроскопічних експериментах. Проте, формула Стокса - Ейнштейна дає вірні по порядку величини оцінки коефіцієнта дифузії. »

Тепер, використовуючи співвідношення (3.6) можемо визначити коефіцієнт дифузії крапель розміром, наприклад, 5 мкм, при температурі 300К:

$$D(1\,мкм, 300\,K) = 10^{-11} \quad \text{м/с}. \qquad (3.7)$$

Ми бачимо, що коефіцієнт дифузії крапель практично всіх розмірів дуже малий. Наприклад для дифузійного розмиття хмари крапель розміром 10 см крапель з радіусом 1 мкм потрібно десятки годин. Таким чином, звичайна дифузія крапель, як броунівських часток не може забезпечити зменшення концентрації крапель у вихідному хмарі за розумний час.

Звідси випливає, що, єдиним процесом, який може призводити до зменшення інфекційної небезпеки хмари маленьких крапель, що знаходиться в атмосфері, є конвекція і турбулентна дифузія (див. перший розділ). Це ті процеси, для здійснення яких необхідний ламінарний або турбулентний рух повітря – вітер

на відкритому просторі, активна і пасивна вентиляція (провітрювання) закритих просторів.

3.2.4. Врахування розподілу капель за розмірами

Дослідження розподілу великих крапель і крапель аерозолю, які виробляються при кашлі та чханні, дають такі результати [77]. Діаметром початкових крапель знаходяться в інтервалі від 1 до 2000 мкм. При цьому 95% крапель знаходяться в інтервалі від 2 до 100 мкм, а більшість крапель знаходиться в інтервалі 4 і 8 мкм. Якщо припустити, що краплі за розмірами розподілені нормальним чином,

$$f(r, R_0, \sigma) = \frac{N}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(r - r_0)^2}{2\sigma}\right) \tag{3.8}$$

то в якості середнього ми можемо взяти величину $r_0 = 6 = (8+4)/2$ мкм, а в якості дисперсії величину $\sigma = 4^2 = (8-4)^2$

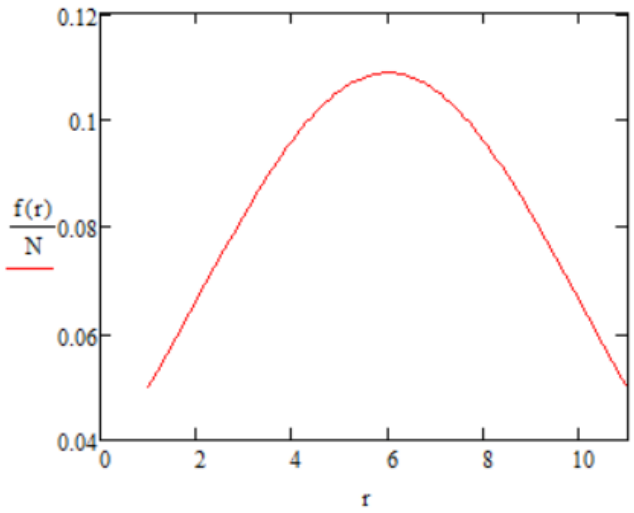


Рис. 3.1. Розподіл крапель аерозолю за розмірами

З Рис.3.1 видно, що розмір крапель в основному такий, що вони формують дихальний аерозоль - носій інфекції SARS-CoV-2, який досить довгий час знаходиться в повітрі.

Що стосується крапель більшого розміру, то не дивлячись на їх здавалося б швидке падіння, виявилося, що за рахунок конвекції якого їх інфекційна небезпека залишається досить великий. Експериментальні дослідження [81, 82] показали, що краплі таких великих розмірів, за рахунок конвекції можуть перебувати в повітрі до 10 хвилин, що дозволяє їм досягати навіть далеких кінців великих кімнат.

Явний вигляд функції розподілу дозволяє нам обчислити середній час перебування в повітрі хмари респіраторних крапель

$$t_{сред} = \frac{1}{N}\int \frac{H}{V_{вниз}(r)} f(r, R_0, \sigma)dr \qquad (3.9)$$

Цей час виявився рівним $t_{сред} = 1600$ с або практично 26 хвилин.

Крім того, наявність функції розподілу дає можливість визначити ефективний розмір крапель, які в основному визначають час падіння хмари.
Це можна зробити за співвідношенням, яке, фактично , визначає усереднення радіусі с ваговим множником, яким є час падіння краплини з певним радіусом.

$$R_{падіння} = \frac{\langle rt(r)\rangle}{\langle t(r)\rangle} = \frac{\int r\dfrac{H}{V_{вниз}(r)} f(r, R_0, \sigma)dr}{\int \dfrac{H}{V_{вниз}(r)} f(r, R_0, \sigma)dr} \qquad (3.10)$$

Цей розмір дорівнював 2,4 мкм. Цю величину і можна розглядати в якості ефективного розміру крапель розгляді більш складних етапів еволюції хмар респіраторного аерозолю носія інфекції.

3.2.5. Етап седиментації та турбулентна дифузія

Наднизьке значення коефіцієнту звичайної молекулярної дифузії (3.6), (3.7) для краплин аерозолю обумовлює необхідність розглядати процеси

турбулентної дифузії для пояснення досить швидкого розмиття хмар аерозолю.

Турбулентна дифузія, це перенесення речовини в просторі, обумовлене турбулентним рухом середовища. Під турбулентним розуміють вихровий рух рідини або газу, при якому елементи (частки) середовища здійснюють невпорядкований, хаотичний. руху по складних траєкторіях, а швидкість, температура, тиск і щільність середовища відчувають хаотичний. флуктуації.

Якщо в турбулентному потоці в певний момент часу безліч елементів (часток) розташоване поруч один з одним, то в наступні моменти часу вони розсіюються по простору так, що статистична відстань між двома будь-якими довільними частинками з плином часу зростає. Прояви цього процесу багато в чому нагадують молекулярну дифузію.

Турбулентний перенос речовини на великій відстані від поверхонь, що обмежують область руху потоку, у багато разів перевищує молекулярне перенесення (тому перемішування середовища часто здійснюють при турбулентному режимі течії). Так, для газів коефіцієнт середній коефіцієнт турбулентної дифузії знаходиться в межах 10^{-4}-10^{-2} м^2 / с. [83].

При таких значеннях коефіцієнту дифузії для дифузійного розмиття хмари аерозолю розміром 10 см потрібно декілька хвилин. Таким чином, турбулентна дифузія крапель може забезпечити конкурентний механізм падінню цих крапель у полі тяжіння і привести до реалізації таких складних явищ релаксації, як седиментація.

В наступному підрозділі розглянемо явище седиментації у застосуванні для релаксації хмар аерозолю, з типовими розмірами для біологічних аерозолів, що виникають під час дихання, чихання або під час кашлю.

3.2.6. Седиментація біологічних аерозолів

Тепер розв’яжемо задачу про седиментації аерозольного хмари для конкретних параметрів, користуючись розв’язком (2.16):

$$n(z,t) = n_1(z,t) + n_2(z,t) \tag{3.11}$$

$$n_1(z,t) = \frac{n_0}{\sqrt{4\pi Dt}}\left\{\exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{4Dt}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_0)^2}{4Dt}\right)\right\}\exp\left(-\frac{c}{2D}\left(z - z_0 + \frac{ct}{2}\right)\right)$$

$$n_2(z,t) = \frac{n_0 c}{2D}\exp\left(-\frac{cz}{D}\right)erfc\left(\frac{z+z_0-ct}{\sqrt{4Dt}}\right).$$

У разі крапель розміром 10 мкм і коефіцієнта дифузії в 10^{-8} м^2 / с ми спостерігаємо картину швидкого падіння хмари крапель на землю практично без дифузного розмиття.

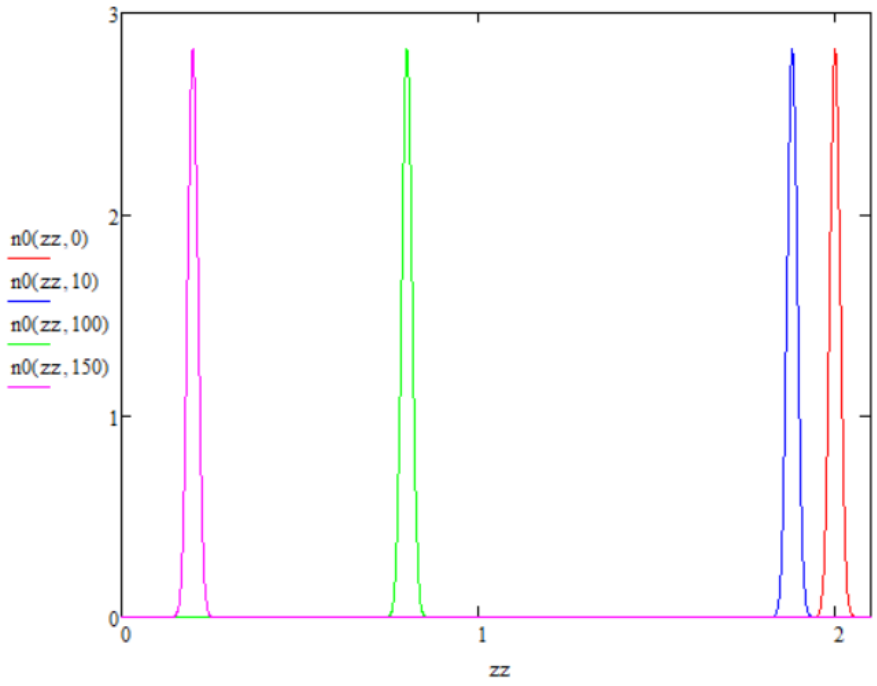


Рис. 3.2. Швидке падіння хмари великих крапель без дифузного розмиття

Тепер розглянемо протилежний випадок малих крапель розміром в 1 мкм, але з відносно ефективною турбулентною дифузією з коефіцієнтом 10^{-2} м^2 / с.

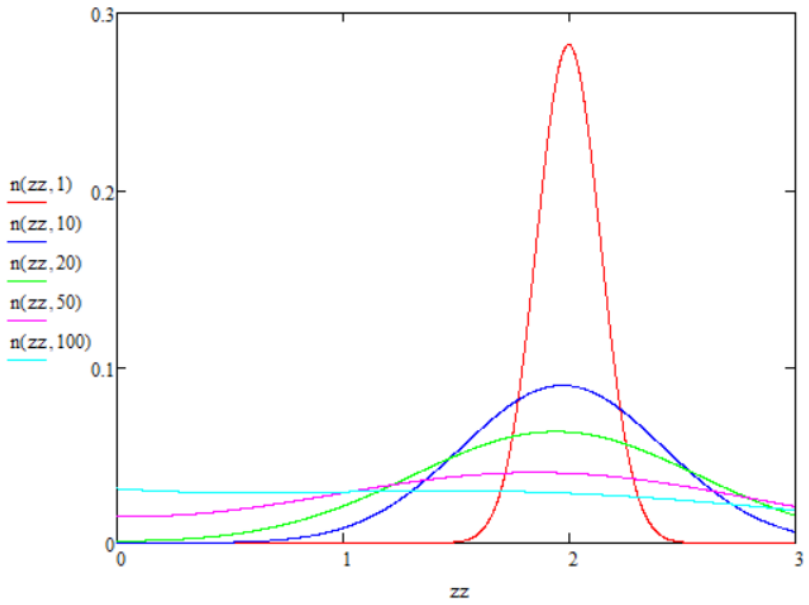


Рис. 3.3. Приклад чисто дифузійного розмиття аерозольної хмари

Тепер розглянемо випадок хмари с краплями характерного певного розміру в 2,4 мкм, який було визначено в попередньому розділі. Для коефіцієнта дифузії вибиралося значення, характерне для турбулентної дифузії в 10^{-4} м^2 / с.

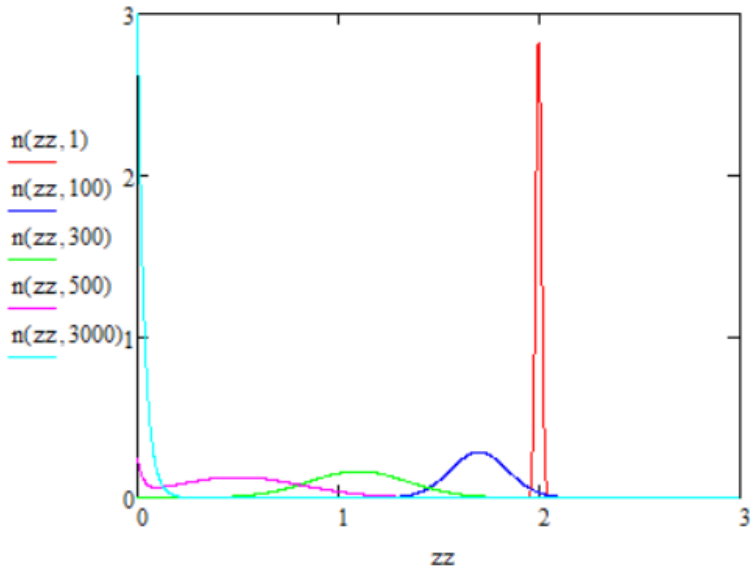


Рис. 3.4. Приклад еволюції хмари краплин певного розміру, як демонстрація явища седиментації.

На Рис.3.4. розподіл щільності має два максимуми. Один вгорі, практично на місці початкового розподілу, а інший внизу, біля землі. На першому етапі еволюції «зникає» перший максимум. Потім, протягом відносно великого часу концентрація дуже розмитої хмари, яка рухається вниз, гранично низька і найчастіше непомітна візуально, і не піддається виміру через малість концентрації. На третьому етапі (як ніби з нічого ☺) починає з'являтися нижній максимум і краплі збираються поблизу землі. При цьому, в нижній хмарі розподіл за висотою практично відразу відповідає експоненціальної барометричній формі. Ця явище отримало назву «седиментація».

З нашої точки зору саме це явище послужило причиною того факту, про який повідомляли китайські дослідники [84]. У лікарні, в якій інфекційне відділення знаходилося на верхніх поверхах, було виявлено, що на нижньому поверсі стали проявлятися випадки зараження CODVID-19, а при цьому, на середніх поверхах випадки зараження не фіксувалися.

Реальні аерозольні хмари складаються з крапель різних розмірів. Тому, проведено порівняльний аналіз еволюції крапель з трьома різними розмірами. Для коефіцієнта дифузії вибиралося значення, характерне для турбулентної дифузії в 10^{-4} м^2 / с.

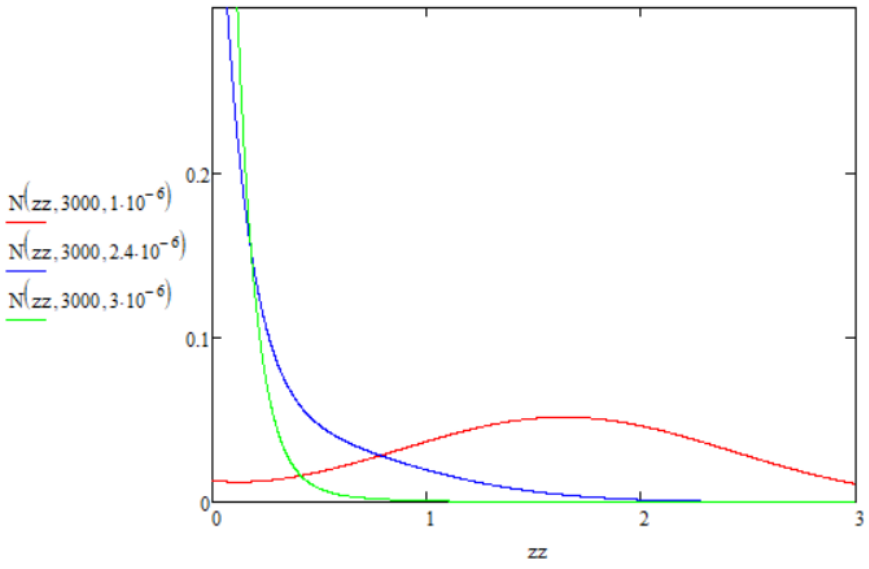


Рис. 3.4. Еволюція аерозолів, що складаються з крапель трьох різних розмірів

Якщо нам відома функція розподілу крапель за розмірами, то співвідношення (3.11) дозволяємо описати еволюцію хмари крапель різних розмірів. Для цього треба усереднити рішення (3.11) за функцією розподілу (3.8) з урахуванням того, що швидкість крапель є функцією їх розміру.

$$N(z,t) = \int n(z,t,c(r))\, f(r, R_0, \sigma) dr \qquad (3.12)$$

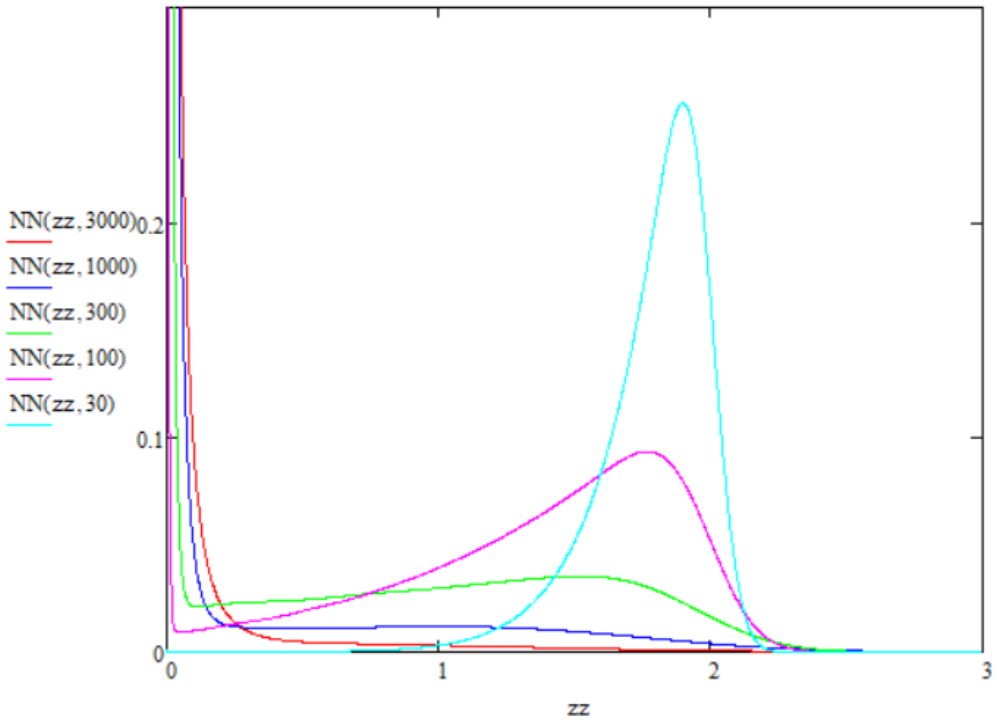


Рис. 3.5. Еволюція початкового аерогелю, який містить краплини різних розмірів.

На Рис. 3.5. спостерігається незвичайне явище рівномірного розподілу крапель за висотою. При цьому відсутня характерні для явища седиментації поділ на дві частини - верхню і нижню.

3.3. Розроблення рекомендації для зменшення інфекційної небезпеки під час епідемії COVID-19

В результатів проведених досліджень фізичних властивостей еволюції біологічних аерозолів – носіїв аерозольних були визначені наступні властивості та зроблені таки рекомендації.

Обчислено середній час, який знаходиться в повітрі біологічний аерозоль, носій коронавірусу COVD-19 – порядку 30 хвилин в відсутності конвекції.

Пропонується цей результат, а не дистанцію між людьми вважати основним для визначення параметрів безпечного знаходження в місцях загального використання. Зокрема, визначення потужності та продуктивність систем вентиляції, періодичності провітрювання аудиторій, частоти проведення дезінфекції громадського транспорту.

Знайдено середній радіус краплини аерозолю – 2,4 мкм. Цю величину можна розглядати, як типову при вивченні інших явищ розповсюдження аерозолю, зокрема явищ седиментації.

Розглянуто задачу про седиментацію та надано пояснення незвичайному перерозподілу біологічних аерозолів - носіїв коронавірусу COVD-19 за поверхами лікарень. Урахування краплин різного розміру дозволило виявити етап просторової еволюції, на якому розподіл за висотою є однорідним.

3.4. Висновки розділу

Таким чином, у розділі розроблені рекомендації для зменшення інфекційної небезпеки під час епідемії COVID-19. Зокрема, з точки зору фізики показано, що не вдається знайти хорошого виправдання для пропонованого відстані в 2 метри, яка повинна дотримуватися між людьми, які проводять довгий час в закритих приміщеннях. Також обчислено середній час, який знаходиться в повітрі біологічний аерозоль, носій коронавірусу COVD-19 – порядку 30 хвилин в відсутності конвекції і запропоновано використання цього параметру для визначення параметрів безпечного знаходження в місцях загального використання.

ВИСНОВКИ

В роботі досягнуто основну мету – розроблені рекомендації з забезпечення зменшення інфекційної небезпеки під час епідемії COVID-19 з точки зору визначення фізичних характеристик просторової та часової еволюції біологічних аерозолів, які є носіями коронавірусу, або рухливості самих макромолекул цього вірусу.

Для досягнення поставленої були вирішені поставлені задачі:

– проведено аналітичне дослідження змінення просторового розподілу аерозолів – носіїв вірусу COVID-19;

– досліджено основні фізичні механізми часової та просторової еволюції аерозолів та пилу в повітрі

– побудовано фізико-математичну модель розглядуваних процесів, в основі якої лежить рівняння дифузії в полі тяжіння.

– здобуто явні аналітичні вирази, які дають опис часової еволюції просторових початкових розподілів.

– проведено порівняння результатів роботи з результатами інших експериментальних робіт та досліджень, де проводилось комп’ютерне моделювання еволюції біологічних аерогелів.

Зокрема, визначеноо середній час, який знаходиться в повітрі біологічний аерозоль, носій коронавірусу COVD-19 – порядку 30 хвилин в відсутності конвекції. Запропоновано цей результат, а не дистанцію між людьми вважати основним для визначення параметрів безпечного знаходження в місцях загального використання. Розглянуто задачу про седиментацію та надано пояснення незвичайному перерозподілу біологічних аерозолів - носіїв коронавірусу COVD-19 за поверхами лікарень.

Урахування краплин різного розміру дозволило виявити етап просторової еволюції, на якому розподіл за висотою є однорідним.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. https://www.worldometers.info/coronavirus/
2. https://www.cdc.gov/widgets/micrositeCollectionViewerMed/index.html?chost=www.nih.gov&cpath=/health-information/coronavirus&csearch=fbclid%3DIwAR2Yhq8hp1zXbTRWmT35UEnnOW6H7UFWGb9ncsBgX677BMqlS0zX65RJA_4&chash=!%2Fdetail%2F403327&ctitle=Coronavirus%20(COVID-19)%20%7C%20National%20Institutes%20of%20Health%20(NIH)&wn=micrositeCollectionViewerMed&wf=/widgets/micrositeCollectionViewerMed/&wid=micrositeCollectionViewerMed1&mMode=widget&mPage=&mChannel=&cdcCollectionid=403305&cdcTheme=theme1&cdcGeotag=%7B%27continent%27:%20%276255149%27,%20%27country%27:%20%276252001%27,%20%27state%27:%20%27%27,%20%27region%27:%20%27%27%20%7D&cdcDataid=404908&chashOptMode=out#!/detail/403327
3. van Doremalen N, Morris D, Bushmaker T et al. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. New Engl J Med 2020 doi: 10.1056/NEJMc2004973.
4. Blocken B, Malizia F, van Druenen T, Marchal T. Towards aerodynamically equivalent COVID-19 1.5 m social distancing for walking and running. Preprint. Available at: http://www.urbanphysics.net/Social%20Distancing%20v20_White_Paper.pdf. Accessed April 20, 2020.
5. Anchordoqui LA, Chudnovsky EM. A physicist view of the airborne infection. Cornell University website. Available at: https://arxiv.org/abs/2003.13689. Submitted March 30, 2020. Accessed April 20, 2020.
6. https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations
7. Taylor C. I. — Proc. Lond. Math., 1922, Ser. 2, v.20, p. 3 – 18.
8. Schmidt W. Der Massen austausch in freien Luft. etc. Hamburg, 1925. 20 S.
9. Сетон О. Г. Микрометеорология. Пер. с англ. М., Гидрометеоиздат, 1958. 230 с.
10. Колмогоров А. Н. — ДАН СССР, 1941, т. 31, №6, с. 538 – 541.

11. Обухов А. М. — Изв. АН СССР. Сер. геогр. и геофиз., 1941. №4 – 5, с. 512 – 522.

12. Calder K. L. — Quart. J. Mech. Appl. Math., 1949, v. 2, p. 153.

13. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Л., Гидрометеоиздат, 1970. 180 с.

14. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., Гидрометеоиздат, 1975. 448 с.

15. Бызова Н. Л. Методическое пособие по рас чету рассеяния примесей в пограничном слое атмосферы. М., Гидрометеоиздат, 1973. 32 с.

16. Безуглая Э. Ю. — Тр. ГГО, вып. 243, 1970, с. 69 – 79.

17. Скорер Р. Аэродинамика окружающей среды.Пер.сангл.М.Мир,1980.550с.

18. Fleischer M. T., Worley F. L. — Atmospheric Environment, 1978, v. 12, p. 1349 – 1357.

19. Cramer H. E. — In: Proc. Inst. Nath. Conf. Appl. Meteorol., Amer. Meteorol. Soc., 1957, p. 63 – 72.

20. Pasquill F. — Meteorol. Mag., 1963, v. 90, p. 25 – 37.

21. Андреев П. И. Рассеяние в атмосферном воздухе газов, выбрасываемых промышленными предприятиями. М., Госстройиздат, 1952. 88 с.

22. Теверовский Е. Н. — В кн.: Новые идеи в области изучения аэрозолей. Изд. – во АН СССР, 1949, с. 108 – 115.

23. Хайкина А. Е. — Тр. НИИСТ, 1969, № 30, С. 120 – 125.

24. Recommended Guide for prediction of the dispersion of auborne effluent (sec. ed.). New York, 180 p. The American Society of Mechanical Engineers, 1973, N 4.

25. Gilbert T. — In.: VDJ Vorträge des Colloguims Düsseldorf, 1972, S. 712.

26. Miller G. W. — Atmospheric Environment, 1978, v. 12, p. 1359 – 1346.

27. Эльтерман В. М. — Вентиляция химических производств. 3 – е изд. М., Химия, 1980. 288 с.

28. Поляков В. В. Канд. дис., М., МИСИ, 1971. 22 с.

29. Реттер Э. И., Стриженов С. И. Аэродинамика зданий. М., Стройиздат, 1968. 240 с.

30. Проветривание промышленных площадок и прилегающих к ним территорий. М., Стройиздат, 1980. 200 с.

31. Титов В. П., Тишкин В. С. — Водос. и сан. техника, 1977, № 7, с. 12 – 14.

32. Puttock I. S., Hunt I. C. R.— Atmospheric Environment, 1979, v. 13, p. 1 – 13.

33. Самсонов В. Т. — Авторефер. канд. дис. М., ЦНИИОТ ВЦСПС, 1980. 22с.

34. Reif, F. Fundamentals of Statistical and Thermal Physics// McGraw Hill New York, 1965. See section 15.5 Langevin Equation.

35. Физическая энциклопедия. В 5 – ти томах. Гл. ред. А. М. Прохоров. — М., Советская энциклопедия, 1988.

36. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 января 2010 г. № 11 «Об утверждении Положения о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население».

37. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. 10. Физическая кинетика/ Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М.: Наука, 1979.

38. Чандрасекар С. Стохастические проблемы в физике и астрономии/ С. Чандрасекар. — М., 1947. — 159 с.

39. Прусс И. Здоровье планеты/ И. Прусс// Знание — сила. 1993. — № 11.

40. Прокопенко А. И., Вайнер В. Г., Галкин В. Л./ ред. В. Г. Вайнера. — Харьков. АО «Бизнес Информ», 1997. – 357 с.

41. https://www.worldometers.info/coronavirus/transmission/

42. https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-virology-012420-022445

Seasonality of Respiratory Viral Infections Miyu Moriyama, Walter J. Hugentobler, and Akiko Iwasaki Annu. Rev. Virol. 2020. 7:2.1–2.19.

43. https://wwwnc.cdc.gov/eid/article/26/7/20-0764_article COVID-19 Outbreak Associated with Air Conditioning in Restaurant, Guangzhou, China, 2020

44. https://www.infectiousdiseaseadvisor.com/home/topics/covid19/respiratory-transmission-of-covid19-coronavirus

45. Thomas RJ. Particle size and pathogenicity in the respiratory tract. *Virulence*. 2013;4(8):847-858.

46. World Health Organization. Modes of transmission of virus causing COVID-19: implications for IPC precaution recommendations. WHO Scientific Brief. March 29, 2020. Accessed April 20, 2020.

47. Shiu EYC, Leung NHL, Cowling BJ. Controversy around airborne versus droplet transmission of respiratory viruses: implication for infection prevention. *Curr Opin Infect Dis*. 2019;32(4):372-379.

48. 3x8. Kutter JS, Spronken MI, Fraaij PL, Fouchier RAM, Herfst S. Transmission routes of respiratory viruses among humans. *Curr Opin Virology*. 2018;28:142-151.

49. Tellier R, Li Y, Cowling BJ, Tang JW. Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary. *BMC Infect Dis*. 2019;19:101-110.

50. Tellier R. Aerosol transmission of influenza A virus: a review of new studies. *J R Soc Interface*. 2009;6(Suppl 6):S783-S790.

51. Liu Y, Ning Z, Chen Y, et al. Aerodynamic characteristics and RNA concentration of SARS-CoV-2 aerosol in Wuhan hospitals during COVID-19 outbreak. *BioRxiv*. 2020. doi: https://doi.org/10.1101/2020.03.08.982637

52. Killingley B, Nguyen-Van-Tam J. Routes of influenza transmission. *Influenza Other Respir Viruses*. 2013;7(Suppl 2):42-51.

53. Grayson SA, Griffiths PS, Perez MK, Piedimonte G. Detection of airborne respiratory syncytial virus in a pediatric acute care clinic. *Pediatr Pulmonol*. 2017;52(5):684-688.

54. Kulkami H, Smith CM, Lee DDH, et al. Evidence of respiratory syncytial virus spread by aerosol. Time to revisit infection control strategies? *Amer J Respir Crit Care Med*. 2016;194:308-316.

55. Yu ITS, Li Y, Wong TW, et al. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus. *New Engl J Med*. 2004;350(17):1731-1739.

56. Olsen SJ, Chang H-L, Cheung TY-Y, et al. Transmission of the severe acute respiratory syndrome on aircraft. *N Engl J Med*. 2003;349:2416-2422.

57. Booth TF, Kournikakis B, Bastien N, et al. Detection of airborne severe acute respiratory syndrome (SARS) coronavirus and environmental contamination in SARS outbreak units. *J Infect Dis*. 2005;191(9):1472-1477.

58. van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH, et al. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. Letter. *N Engl J Med*. 2020;382:1564-1567.

59. Guo Z-D, Wang Z-Y, Zhang S-F, et al. Aerosol and surface distribution of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 in hospital wards, Wuhan, China, 2020 [published online April 10, 2020]. *Emerg Infect Dis*. 2020:26(7). doi:10.3201/eid2607.200885

60. Cai J, Sun W, Huang J, Gamber M, Wu J, He G. Indirect virus transmission in cluster of COVID-19 cases, Wenzhou, China, 2020. *Emerg Infect Dis*. 2020:26(6). doi:10.3201/eid2606.200412

61. Faridi S, Niazi S, Sadeghi K, et al. A field indoor air measurement of SARS-CoV-2 in the patient rooms of the largest hospital in Iran. *Sci Total Environ*. 2020:725:138401.

62. Santarpia JL, Rivera DN, Herrera V, et al. Transmission potential of SARS-CoV-2 in viral shedding observed at the University of Nebraska Medical Center [published online March 26, 2020].
medRxiv. doi:https://doi.org/10.1101/2020.03.23.20039446

63. Feng S, Shen C, Xia N, Song W, Fan M, Cowling BJ. Rational use of face masks in the COVID-19 pandemic [published online March 20, 2020]. *Lancet Respir Med*. 2020. doi:10.1016/S2213-2600(20)30134-X

64. The National Personal Protective Technology Laboratory (NPPTL). Respirator Trusted-Source Information. Section 3: Ancillary Respirator Information. Centers for Disease Control and Prevention website. Available at: https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/disp_part/respsource3healthcare.html. April 9, 2020. Accessed April 20, 2020.

65. MacIntyre CR, Chughtai AA. Facemasks for the prevention of infection in healthcare and community settings. *BMJ*. 2015;350:h694.

66. Offeddu V, Yung CF, Low MSF, Tam CC. Effectiveness of masks and respirators against respiratory infections in healthcare workers: a systematic review and meta-analysis. *Clin Infect Dis*. 2017;65(11):1934-1942.

67. Bartoszko JJ, Farooqi MAM, Alhazzani W, Loeb M. Medical masks vs N95 respirators for preventing COVID-19 in health care workers. A systematic review and meta-analysis of randomized trials [published online April 4, 2020]. *Influenza Other Respir Viruses*. doi:10.1111/irv.12745

68. Roy CJ, Milton DK. Airborne transmission of communicable infection- the elusive pathway. Perspective. *N Engl J Med*. 2004;350(17):1710-1712.

69. Wang J, Du G. COVID-19 may transmit through aerosol. *Ir J Med Sci*. 2020;1-2.

70. Centers for Disease Control and Prevention. Social Distancing, Quarantine, and Isolation. https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/social-distancing.html. April 4, 2020. Accessed April 20, 2020.

71. Bourouiba L. Turbulent gas clouds and respiratory pathogen emissions: potential implications for reducing transmission of COVID-19 [published online March 26, 2020]. *JAMA*. doi:10.1001/jama.2020.4756

72. Anchordoqui LA, Chudnovsky EM. A physicist view of the airborne infection.CornellUniversity website. Available at: https://arxiv.org/abs/2003.13689. Submitted March 30, 2020. Accessed April 20, 2020.

73. Blocken B, Malizia F, van Druenen T, Marchal T. Towards aerodynamically equivalent COVID-19 1.5 m social distancing for walking and running. Preprint. Available at:

74. http://www.urbanphysics.net/Social%20Distancing%20v20_White_Paper.pdf . Accessed April 20, 2020.

75. P. C. Y.Woo, Y. Huang, S. K. P. Lau, and K. Y. Yuen, Coronavirus genomics and bioinformatics analysis, Viruses 2, 1804 (2010). doi:10.3390/v2081803

76. J. Einarsson and B. Mehlig, Spherical particle sedimenting in weakly viscoelastic shear flow, Phys. Rev. Fluids 2, 063301 (2017). doi:10.1103/PhysRevFluids.2.063301

77. W. F. Wells, On air-borne infection study II: droplets and droplet nuclei, Am. J. Hyg. 20, 611 (1934).

78. F. Liu, H. Qian, X. ZhengJ. Song, G. Cao, and Z. Liu, Evaporation and dispersion of exhaled droplets in stratified environment, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 609 042059 (2019). doi:10.1088/1757-899X/609/4/042059

79. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%BE%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%AD%D0%B9%D0%BD%D1%88%D1%82%D0%B5%D0%B9%D0%BD%D0%B0

80. J. P. Duguid, The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets anddroplet-nuclei,J. Hyg. (Lond.) 44, 471 (1946). doi:10.1017/s0022172400019288

81. L. Bourouiba, E. Dehandschoewercker, and J. W. M. J. Bush, Violent expiratory events: on coughing and sneezing, Fluid Mech. 745, 537 (2014). doi:10.1017/jfm.2014.88

82. B. E. Scharfman, A. H. Techet, J. W. M. Bush, and L.Bourouiba, Visualization of sneeze ejecta: steps of fluidfragmentation leading to respiratory droplets, L. Exp. Fluids 57, 24 (2016). doi:10.1007/s00348-015-2078-4

83. https://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/4624.html#:~:text=%D0%A2%D0%A3%D0%A0%D0%91%D0%A3%D0%9B%D0%95%D0%9D%D0%A2%D0%9D%D0%90%D0%AF%20%D0%94%D0%98%D0%A4%D0%A4%D0%A3%D0%97%D0%98%D0%AF,)%20%D1%81%D1%80%D0%B5%D0%B4%D1%8B%20%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%88%D0%B0%D1%8E%D1%82%20%D0%BD%D0%B5%D1%83%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%BE%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5%2C%20%D1%85%D0%B0%D0%BE%D1%82%D0%B8%D1%87.

84. https://www.cidrap.umn.edu/news-perspective/2020/03/study-covid-19-may-spread-several-different-ways; N Engl J Med 2020; 382:1564-1567. DOI: 10.1056/NEJMc2004973