

ГІПОТЕЗИ. НЕСТАНДАРТНІ МЕТОДИ РІШЕННЯ НАУКОВИХ ТА ІНЖЕНЕРНИХ ПРОБЛЕМ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 621: 514.83

ФАНТОМНА МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ВІРУСНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ПАНДЕМІЇ. ЧАСТИНА 2

Скицюк В. І., Клочко Т. Р.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: t.klochko@kpi.ua

Вступ. Попередній розгляд проблеми розповсюдження вірусів у просторі, досліджений авторами [1], доводить, що характер їх руху є залежним від особливостей формотворення цих об'єктів, а тому було визначено основні аспекти залежності геометричних розмірів зони присутності об'єктів при взаємодії з іншими об'єктами, в тому числі на польовому рівні. Оскільки дослідження проводились у припущенні щодо формалізації ідеальної структури зони присутності (розповсюдження) матеріальних частинок, актуальність подальшого дослідження підтверджується вимогами до необхідності визначення реальних розмірів потоків.

Результати дослідження. Основною метою цього дослідження було продовження створення моделі розповсюдження вірусів як матеріальних частинок у навколишньому просторі. Як наслідок аналітичного моделювання особливостей характеру розповсюдження тіла вірусу в навколишньому середовищі показано, що вірус як фізичний об'єкт знаходиться під постійною дією різних сил на шляху від джерела до споживача. На останньому етапі у приповерхневому шарі він гальмується, хоча назвати це повноцінним гальмуванням навряд чи можливо, оскільки при сталому імпульсі скорочується довжина вільного пробігу. У приповерхневому шарі потік середовища має турбулентне обтікання поверхні. На підставі проведеного дослідження визначено, що саме геометрична форма, а точніше його фантом, відіграють основну роль при його русі у середовищі. Таким чином, моделювання руху частинок у просторі показало, що як фізичний об'єкт вірус не може утворювати жорстку ситуацію удару, оскільки має досить велику панданну зону з рецепторів. Панданна зона вірусу має низку розріджених рецепторів, які значно пом'якшують удар.

Висновки. Отже, розглянуто особливості розповсюдження потоку вірусів у навколишньому середовищі за наявності певних умов взаємодії об'єктів. Обґрунтовано аналітичну модель розповсюдження потоків вірусних об'єктів як потоків матеріальних частинок у просторово-часових координатах та визначено основні особливості такого руху в приповерхневих середовищах об'єкту та на віддаленні від нього.

У подальших дослідженнях фантомна модель розповсюдження потоків вірусних об'єктів у просторі потребує моделювання руху, та торкання поверхні об'єкта на рівні різних типів торкання залежно від стану їх взаємодії.

Ключові слова: панданна зона; зона присутності; потік вірусів; розповсюдження.

Вступ. Постановка проблеми

Основною метою цього дослідження було продовження створення моделі розповсюдження вірусів як матеріальних частинок у навколишньому просторі.

У попередній роботі [1] ми розглянули розповсюдження вірусів у навколишньому просторі за ідеальних умов. З цього розгляду дуже добре видно, що, водночас, ми отримуємо заражений простір у вигляді кулі, а концентрація вірусів змінюється за експоненціальним законом від центру до периферії. Панданна зона присутності вірусів (ЗВП) [2] закінчується за величини [S], а панданна зона зараження закінчується величиною [E]. Звісно, що така модель процесу не є досконалою, оскільки ЗВП не

стійка та легко деформується навіть за дії незначних сил. Наразі існують моделі розповсюдження вірусів різного типу [3 – 5], але ці дослідження не вирішують проблеми взаємодії матеріальних частинок, якими є вірусні об'єкти, при проходженні їх потоків у координатному просторі. Тому необхідним є створення моделей, що визначають залежності потоків у просторово-часових координатах навколишнього середовища.

Мало того, виділення вірусів з поверхні материнського тіла неоднакове за різними напрямками. Так, наприклад, для людини основним розповсюджувачем вірусів є відкриті ділянки тіла, тобто впершу чергу голова. Мало того, рот та ніс є джерелами, які у десятки разів більше викидають вірусів ніж шкіра.

Моделювання проходження потоків вірусів у просторово-часових координатах середовища та особливості їх взаємодії

Первинна модель материнського тіла, яку ми обрали, мала форму кулі, тим не менш людська голова відрізняється від такої форми. Оскільки ми проводимо дослідження у площині перерізу за координатами x, y , то така форма більше нагадує форму мушлі Паскаля [6]. При цьому опис характеру корпускулярного потоку вірусів повинен мати вигляд наближений до закону Ламберта [7], стосовно розсіювання світлового потоку, відбитого від поверхні. Цей закон, хоч і стосується потоку світла, може цілком бути застосованим відносно корпускулярного потоку. Отже, якщо скористатися принципами закладеними у закон Кірхгофа [7], а елемент випромінювання прийняти точкової форми, який знаходиться трохи нижче за поверхню, то відбитий потік вірусів визначиться, як

$$P = P_0 \cos \theta. \quad (1)$$

Суто з математичного погляду залежність (1) надає опис кола з діаметром P_0 , яке знаходиться на пласкій поверхні напівпростору. Розглянемо діаграму таким чином, щоб напрямок вектора P_0 співпадав з абсцисою x (рис. 1).

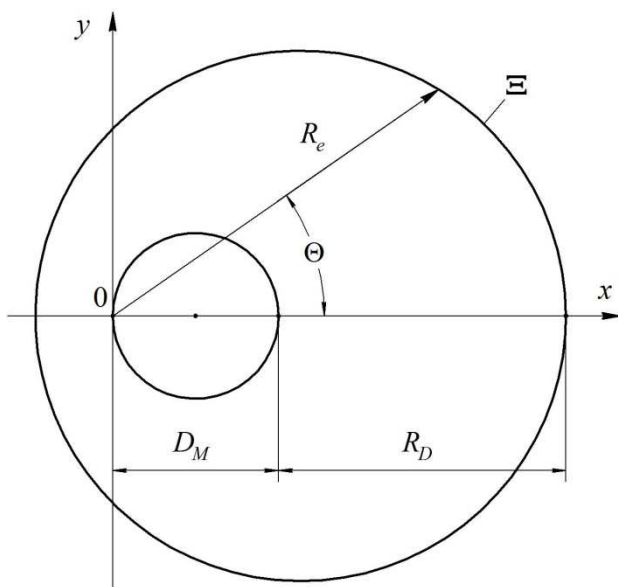


Рис. 1. Діаграма вірусної зони присутності материнського тіла

На рис. 1 наведено за схемою виразу (1) внутрішнє коло діаметром D_M , яке відображає материнське тіло у площині xOy .

На першому етапі розповсюдження вірусів ми маємо дифузійний процес, і тому зона присутності об'єкта отримує додатковий радіус R_D , що разом з діаметром D_M створює еквівалентний радіус $R_e = D_M + R_D$, який описує межі зони присутності обов'язкового зараження. Оскільки ми оцінюємо

R_D як відстань від поверхні діаметру D_M , то форма зони присутності буде наближатися до форми мушлі Паскаля. Форма цієї кривої четвертого порядку має опис через рівняння у декартових координатах:

$$(x^2 + y^2 - D_M^2 x)^2 - R_D^2 (x^2 + y^2) = 0$$

$$\text{при } D_M > R_D \quad (2)$$

або у параметричному вигляді

$$x = D_M \cos^2 t + R_D \cos t,$$

$$y = D_M \cos t \cdot \sin t + R_D \sin t,$$

$$0 \leq t \leq 2\pi. \quad (3)$$

У полярних координатах

$$\rho = D_M \cos \theta + R_D. \quad (4)$$

Стосовно останнього виразу (4) досить легко доводиться, що

$$R_e = D_M \cos \theta + R_D. \quad (5)$$

Віруси з ближньої зони присутності $< R_e$ переносяться безпосереднім рухом середовища, у якому знаходиться материнське тіло. Такий відносний рух призводить до зміщення вірусу за вектором R_c (рис. 2).

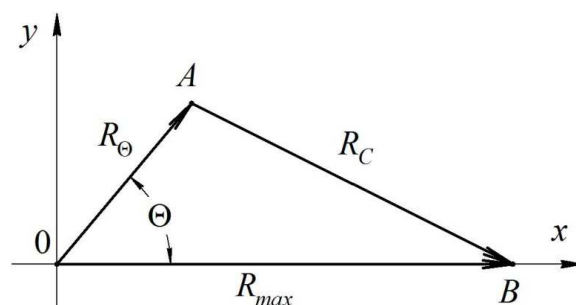


Рис. 2. Векторна діаграма руху вірусів у середовищі

Як наслідок, ми отримуємо три вектори, які у підсумку дають діаграму направленості руху вірусів відносно ближньої зони присутності (рис. 2). Вектор R_e визначається з виразу (5), де переважає звичайна дифузія. Вектор, який дає опис руху в середовищі, є $AB = R_c$. Разом сума цих векторів утворює векторну діаграму, де радіус-вектор R_{max} утворює радіус зони присутності вірусів. Користуючись теоремою косинусів, маємо можливість записати векторне рівняння як суму сторін трикутника та кута між ними, тобто

$$R_c^2 = R_e^2 + R_{max}^2 - 2R_e R_{max} \cos \theta,$$

$$\text{при } -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}. \quad (6)$$

Розгорнемо рівняння (6) відносно R_{max} , як

$$R_{max}^2 - 2R_e R_{max} \cos \theta + R_e^2 - R_c^2 = 0. \quad (7)$$

Вирішуючи це рівняння (7) відносно R_{\max} , отримуємо наступний результат

$$R_{\max} = R_e \cos \theta + \sqrt{R_e^2 (\cos^2 \theta - 1) + R_C^2}. \quad (8)$$

Або, підставляючи значення R_e з виразу (5), отримуємо

$$R_{\max} = (D_M \cos \theta + R_D) \cos \theta + \sqrt{R_C^2 - (D_M \cos \theta + R_D)^2 \cdot \sin^2 \theta}. \quad (9)$$

Діаграма спрямованості за (9) має форму кардіоїди, яка із зростанням радіуса R_C поступово отримує форму zdeформованого кола. Передній фронт діаграми переміщено вперед на величину $D_M + R_C$ (точка В), в той час, як задній фронт зменшено на величину $R_C + D_M$ (при $\theta = 3\pi/4$).

Діаграма розповсюдження вірусів має максимум, коли вектор руху середовища співпадає з напрямком руху видихаємого повітря живого організму. Небезпечна зона (ЗВЗ) концентрації вірусів буде значно менша за радіус R_{\max} за виразом (9), оскільки реальні умови дифузійних процесів будуть відрізнятися від уявних. Наразі вираз (9) не враховує турбулентність руху повітря при видиханні повітря живою істотою.

Наступна властивість вірусу, яку нам необхідно розглянути, це його геометрична форма. Саме геометрична форма, а точніше його фантом, відіграють основну роль при його русі у середовищі. Геометрична форма вірусу повністю підпадає під поняття панданної зони абстрактного об'єкту [8]. Саме панданна зона пояснює всі можливі варіанти рухів вірусу у просторі, оскільки визначає його активність при торканні з абстрактним об'єктом. Будемо вважати, що вірус як фізичний об'єкт підкоряється законам броунівського руху, тобто має деякий відтинок шляху, який можна вважати прямолінійним. У такому випадку ми маємо можливість розглянути статичну модель геометрії вірусу.

Для цього розглянемо середньостатистичну форму вірусу, яка ґрунтується навколо кульки згідно сучасних медичних уявлень (рис. 3), де: 1 - мембрана; 2 - рецептори; 3 - білковий капсид; 4 - фермент зворотня транскриптаза; 5 - РНК; 6 - панданний вакуум.

Отже, для того, щоб побудувати опосередковану модель панданної зони вірусу, нам необхідно врахувати його наступні конструкційні елементи (рис. 3). Основною складністю об'єкту такої форми є жорсткість поверхні та нерівномірний розподіл маси у його тілі.

У нашому випадку, оскільки ми маємо нерівномірний розподіл маси, то буде існувати різниця між розташуванням геометричного центру симетрії та реальним центром мас окремих частин вірусу [9].

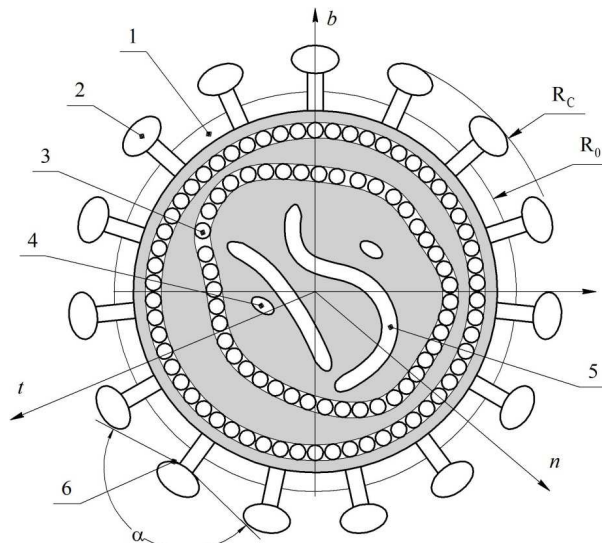


Рис. 3. Абстрактна опосередкована модель вірусу кулястої форми

Отже, якщо загальна маса вірусу є M , а щільність розподілу маси $\delta(x,y,z)$, то координати центру ваги визначаються як

$$\xi_0 = \frac{1}{M} \iiint_{(Q_B)} x \delta(x,y,z) dx dy dz \quad (10)$$

$$\eta_0 = \frac{1}{M} \iiint_{(Q_B)} y \delta(x,y,z) dx dy dz$$

$$\xi_0 = \frac{1}{M} \iiint_{(Q_B)} z \delta(x,y,z) dx dy dz$$

Геометричний центр симетрії ми отримуємо за умови симетрії маси у просторі об'єму вірусу, тобто $\delta(x,y,z)=1$ у будь-якій точці простору вірусного об'єму Q_B .

Отже, геометричним центром вірусу буде

$$\xi = \frac{1}{M} \iiint_{(Q_B)} x dx dy dz,$$

$$\eta = \frac{1}{M} \iiint_{(Q_B)} y dx dy dz,$$

$$\xi = \frac{1}{M} \iiint_{(Q_B)} z dx dy dz. \quad (11)$$

Як наслідок, маємо наступну ситуацію. При русі вірусу в просторі кожний з цих центрів має реакцію на взаємодію з польовими структурами середовища, а існуюча різниця між координатами призводить до виникнення крутного моменту відносно центру мас [8].

У загальному вигляді ця відстань визначається як

$$L = \left[\begin{aligned} & ((\xi_0 - \xi)^2 + (\eta_0 - \eta)^2 + (\xi_0 - \xi)^2 + \\ & + 2(\eta_0 - \eta)(\xi_0 - \xi)k_1 + \\ & + 2(\xi_0 - \xi)(\xi_0 - \xi)k_2 + \\ & + 2(\xi_0 - \xi)(\eta_0 - \eta)k_3 \end{aligned} \right]^{1/2}, \quad (12)$$

де k_1, k_2, k_3 - косинуси координатних кутів.

Внаслідок обертання у віруса з'являється крутний момент

$$\mathbf{M}_0 = \bar{\Gamma} \times \bar{\mathbf{M}}. \quad (13)$$

Для побудови моделі руху вірусу у просторі розглянемо спочатку статичний варіант, тобто коли він має миттєвий характер. При цьому, коли

$$\begin{aligned} \text{при } t=0 \quad & V_n = 0 \quad \omega_n = 0 \\ & V_b = 0 \quad \omega_b = 0, \quad (14) \\ & V_i \neq 0 \quad \omega_i = 0 \end{aligned}$$

маємо фрагмент криволінійного циліндру діаметром $2R_0$ та площею перерізу πR_0^2 як наслідок руху суцільної центральної маси. Одночасно з цим потік маси від радіуса R_0 до радіуса R_c буде мати мінливий характер. Як наслідок, ця частина перерізу є активною динамічною або активною панданною зоною, де відбувається ефект самопоглинання панданної зони.

Відповідно об'єм цієї зони буде

$$\begin{aligned} [Q_b = \pi(R_c^2 - R_0^2) \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1+(y')^2} dx = \\ = \pi(R_c^2 - R_0^2) \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} dt \end{aligned} \quad (15)$$

При цьому внутрішня панданна зона визначається, як

$$\begin{aligned} [Q_b = \pi(R_0^2) \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1+(y')^2} dx = \\ = \pi(R_0^2) \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} dt \end{aligned} \quad (16)$$

Особливу активність вірус визначається за верхівками рецепторів (рис. 3), що відповідає зовнішньому радіусу R_c . Тому повний активний об'єм визначиться як циркуляція верхівки вектора R_c і становитиме

$$\begin{aligned} [Q_b = \pi(R_c^2) \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1+(y')^2} dx = \\ = \pi(R_c^2) \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} dt \end{aligned} \quad (17)$$

Але, окрім поступового, вірус має і обертальний рух, який утворюється під дією моменту (13). Здебільшого будь-яке тіло, тим більш кулясте, завжди обертається навколо центру ваги. Отже, такий об'єкт має наступні рівняння обертального руху

$$\begin{cases} I_x \omega_x + (I_z - I_y) \omega_y \omega_z = M_x + M_x^u + m(y_A g_z - z_A g_y) \\ I_y \omega_y + (I_x - I_z) \omega_x \omega_z = M_y + M_y^u + m(y_A g_x - z_A g_z) \\ I_z \omega_z + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y = M_z + M_z^u + m(y_A g_y - z_A g_x) \end{cases} \quad (18)$$

де M_x, M_y, M_z – проекції на відповідні осі моментів активних сил;

g_x, g_y, g_z – проекції вектора прискорення на осі O_x, O_y, O_z .

M_x^u, M_y^u, M_z^u – моменти сил інерції,

обумовлені відцентровими моментами інерції, як наприклад

$$\begin{aligned} M_x^u = I_{xy} \omega_x + I_{xz} \omega_z - I_{xy} \omega_x \omega_z + \\ + I_{zx} \omega_y \omega_x + I_{zy} (\omega_y^2 - \omega_z^2) \end{aligned}$$

Рівняння (75) доповнюється кінематичними співвідношеннями, які пов'язують їх з кутами Ойлера, і мають наступний вигляд

$$\begin{cases} \omega_x = \dot{\psi} \sin \theta \cos \varphi - \dot{\theta} \sin \varphi \\ \omega_y = \dot{\psi} \cos \varphi + \dot{\psi} \\ \omega_z = \dot{\psi} \sin \theta \sin \varphi - \dot{\theta} \cos \varphi. \end{cases} \quad (19)$$

Оскільки рівняння (18) та (19) дуже складно піддаються інтегруванню, то застосовується так звана методика Ойлера. Сутність цієї методики полягає в тому, що центр мас збігається з точкою опори і не має моментів зовнішніх сил, тобто рух за інерцією. У такому випадку рівняння (18) набувають вигляду

$$\begin{cases} I_x \omega_x + (I_z - I_y) \omega_y \omega_z = 0 \\ I_y \omega_y + (I_x - I_z) \omega_x \omega_z = 0 \\ I_z \omega_z + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Тим не менш ця система рівнянь ще досить складна до вирішення, тому кожне рівняння множиться на відповідно $I_x \omega_x, I_y \omega_y$ та $I_z \omega_z$. Підсумок рівнянь (20) у такому випадку буде дорівнювати (після диференціювання)

$$d/dt(I_x^2 \omega_x + I_y^2 \omega_y + I_z^2 \omega_z) = 0. \quad (21)$$

Після інтегрування (21) отримуємо

$$I_x^2 \omega_x^2 + I_y^2 \omega_y^2 + I_z^2 \omega_z^2 = K_0^2 = const. \quad (22)$$

Цей вираз доводить, що кінетичний момент вірусу під час руху не змінюється у часі і просторі. Чергова низка перетворень рівняння (22) призводить до висновку, що

$$I_x \omega_x^2 + I_y \omega_y^2 + I_z \omega_z^2 = 2E_k = const \quad (23)$$

або, як наслідок

$$2E_k = K_0 \omega = const. \quad (24)$$

Навіть за такого випадку визначення кутів Ойлера вимагає досить складних математичних перетворень. У цьому випадку приймається, що вірус обертається за однією віссю $O_y = (I_x = I_y)$ (вісь b рис. 3). У такому випадку друге рівняння у системі (20) набуває виду

$$I_y \frac{d\omega_y}{dt} = 0. \quad (25)$$

Окрім того, кути Ойлера за умови $I_x \neq I_y = I_z$ визначаються як

$$\begin{cases} \theta = \theta_0 \\ \varphi = n_y t + \varphi_0 \\ \psi = n t + \psi_0 \end{cases} \quad (26)$$

Вираз (26) є загальним розв'язком рівнянь (7) за вище означених умов. За цього виду руху вісь симетрії вірусу O_y буде описувати конус з растровим кутом $2\theta_0$, рівномірно обертаючись з кутовою швидкістю $\dot{\psi} = n$ навколо вектора кінетичного моменту K_0 . Вірус при такому русі обертається навколо своєї осі симетрії O_y за кутової швидкості $\dot{\psi} = n_1$.

Отже, ми розглянули найпростіший випадок, коли вірус обертається навколо свого центру мас. Але, як доводять дослідження [10], рух об'єкту з шістьма ступенями свободи навколо свого центру мас може мати вирішення лише за окремих випадків $I_y \neq I_z = I_x$. Але маси елементів у середині вірусу не мають статичного розташування у межах його об'єму, тому, як наслідок, маємо $I_x \neq I_y = I_z$.

Таким чином, констатуємо той факт, що радіус вектор R_c циркулює у об'ємі вірусу, тобто

$$Q_{\pi R_c}^{R_c} \lim_{\substack{\omega_x \rightarrow 0 \\ \omega_y \rightarrow 0 \\ \omega_z \rightarrow 0}} Q(R_c) = \frac{3}{4} \pi R_c^3 \quad (27)$$

Аналітичний апарат стосовно радіус-вектору R_0 аналогічний, що і для R_c , тобто

$$Q_{\pi R_0}^{R_0} \lim_{\substack{\omega_x \rightarrow 0 \\ \omega_y \rightarrow 0 \\ \omega_z \rightarrow 0}} Q(R_0) = \frac{3}{4} \pi R_0^3 \quad (28)$$

Таким чином, ми маємо можливість сформулювати поняття про енергетичну насиченість маси панданної зони умовного спокою та рухомої частини вірусу

$$E_{II} = \frac{E_0}{Q_0} + \frac{E_-}{Q_-}, \quad (29)$$

де E_0 – кінетична енергія маси спокою, Q_0 – об'єм маси спокою, E_- – енергія мінливої зони маси, Q_- – об'єм мінливої панданної зони.

Кінетична енергія маси спокою визначається як

$$E_0 = \frac{1}{2} I_0 \omega^2 = \frac{1}{2} \frac{2}{5} m_0 R_0^2 \omega^2. \quad (30)$$

Об'єм статичної панданної зони (маси спокою) визначається як

$$Q_0 = \frac{4}{3} \pi R_0^3. \quad (31)$$

Енергетична насиченість статичної панданної зони визначиться як

$$\frac{E_0}{Q_0} = \frac{\frac{1}{5} m_0 R_0^2 \omega^2}{\frac{4}{3} \pi R_0^3} = \frac{3}{5} \frac{m_0 \omega^2}{\pi R_0} = \frac{3}{5} \frac{\pi m_0}{T^2 R_0}, \quad (32)$$

де $\omega = \frac{2\pi}{T}$, де T – період обертання вірусу навколо своєї осі.

Енергія зони мінливої маси

$$E_- = \frac{1}{2} I_- \omega^2 = \frac{1}{5} m_- \frac{R_c^5 - R_0^5}{R_c^3 - R_0^3} \omega^2; \quad (33)$$

об'єм мінливої панданної зони

$$Q_- = \frac{4}{3} \pi (R_c^3 - R_0^3); \quad (34)$$

енергетична насиченість мінливої панданної зони визначається, як

$$\begin{aligned} \frac{E_-}{Q_-} &= \frac{\frac{1}{5} m_- \frac{R_c^5 - R_0^5}{R_c^3 - R_0^3} \omega^2}{\frac{4}{3} \pi (R_c^3 - R_0^3)} = \\ &= \frac{3}{20} \frac{m_- (R_c^5 - R_0^5)}{\pi (R_c^3 - R_0^3)^2} \omega^2 = \frac{3}{5} \frac{m_- \pi}{T^2} \frac{R_c^5 - R_0^5}{(R_c^3 - R_0^3)^2}. \end{aligned} \quad (35)$$

У підсумку енергетична насиченість вірусу за обертання визначається як

$$\begin{aligned} E_B &= \frac{3}{5} \frac{\pi m_0}{T^2 R_0} + \frac{3}{5} \frac{m_- \pi}{T^2} \frac{R_c^5 - R_0^5}{(R_c^3 - R_0^3)^2} = \\ &= \frac{3}{5} \frac{\pi}{T^2} \left[\frac{m_0}{R_0} + m_- \frac{R_c^5 - R_0^5}{(R_c^3 - R_0^3)^2} \right]. \end{aligned} \quad (36)$$

Кількість руху L_B , що виконує тіло вірусу визначається наступним чином

$$L_B = L_0 + L_-, \quad (37)$$

де кількість руху статичної панданної зони визначиться як

$$L_0 = I_0 \omega = \frac{2}{5} m_0 R_0^2 \omega = \frac{4\pi}{5T^2} m_0 R_0^2. \quad (38)$$

Кількість руху мінливої панданної зони визначається як

$$\begin{aligned} L_- &= I_- \omega = \frac{2}{5} m_- \frac{R_c^5 - R_0^5}{R_c^3 - R_0^3} \frac{2\pi}{T} = \\ &= \frac{4\pi}{5T} m_- \frac{R_c^5 - R_0^5}{R_c^3 - R_0^3} \end{aligned} \quad (39)$$

або у підсумку

$$\begin{aligned} L_B &= \frac{4\pi}{5T} m_0 R_0^2 + \frac{4\pi}{5T} \frac{R_c^5 - R_0^5}{R_c^3 - R_0^3} m_- = \\ &= \frac{4\pi}{5T} \left(m_0 R_0^2 + m_- \frac{R_c^5 - R_0^5}{R_c^3 - R_0^3} \right). \end{aligned} \quad (40)$$

Отже, все вищерозглянуте стосувалося енергетичної насиченості рухомого вірусу, який обертається, та стосувалося енергії обертального руху. Тому до визначення повної енергії необхідно додавати енергію від поступового руху вірусу, тобто повна енергія вірусу як механічного об'єкту буде сумою енергій поступального та обертального рухів

$$E_B = E_K + E_{B0}. \quad (41)$$

При цьому кінетична енергія поступального руху визначиться як

$$E_K = \frac{(m_0 + m_-) V_B^2}{2}. \quad (42)$$

Звідсіля енергетична насиченість визначається як

$$\frac{E_K}{Q_{ПВ}^{RC}} = \frac{(m_0 + m_-) V_B^2}{\frac{3}{4} \pi R_c^3} = \frac{4}{3} \frac{(m_0 + m_-) V_B^2}{\pi R_c^3} \quad (43)$$

При визначенні кількості руху у виразі (37) член L_x приймає вигляд

$$L_x = I\omega = \frac{2}{5} (m_0 + m_-) R_c^2 \omega = \frac{4\pi}{5T} (m_0 + m_-) R_c^2. \quad (44)$$

Отже, кожний вірус має свою енергетичну насиченість, яка не дозволяє йому знаходитися у стані спокою.

На початку ми вже розглядали вірус як об'єкт броунівського руху. Основна риса такого руху полягає у тому, що вірус як фізичний об'єкт час від часу співударяється з іншими об'єктами. Для віруса як фізичного об'єкту існують наступні варіанти зіткнення.

По-перше, це зіткнення з пласкою поверхнею людського або іншого тіла, яке має значно більшу твердість.

По-друге, зіткнення з іншими вірусом.

По-третє, поступове гальмування при потраплянні у шпарину на поверхні об'єкту.

Отже, як фізичний об'єкт вірус не може утворювати жорстку ситуацію удару, оскільки має досить велику панданну зону з рецепторів. Панданна зона віруса має низку розріджених рецепторів, які значно пом'якшують удар.

Теорія удару добре розглянута в теоретичній механіці [10]. Перший і найпростіший випадок удару – це удар об тверду поверхню. При цьому вірус вдаряється об поверхню і відскакує від неї. Швидкість відскоку (u) при цьому менша за первинну V , що визначає так званий коефіцієнт відновлення

$$k = \left| \frac{u}{V} \right| \quad (45)$$

При зміні кута удару об поверхню коефіцієнт k

$$k = \left| \frac{u_n}{V_n} \right| \quad (46)$$

Звідкіля отримуємо

$$|u_n| = k |V_n|, \quad (47)$$

де $|u_n|$ та $|V_n|$ – абсолютні величини проєкцій швидкостей \vec{u} , \vec{V} , на нормаль.

Модуль швидкості віруса u після удару визначиться як

$$u = V \sqrt{\sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha}, \quad (48)$$

де $\alpha = \arctg \frac{V_\tau}{|V_n|}$ – кут удару вірусу об поверхню.

Наступна ситуація виникає, коли існує співудар між вірусами. У цьому випадку отримуємо модуль ударного імпульсу, який визначається як [10]

$$S' = (1+k) \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (V_1 - V_2), \quad (49)$$

де m_1, m_2 – маса вірусів; V_1, V_2 – швидкість вірусів до удару. Якщо зважити на те, що $m_1 = m_2 = m_0 + m_-$, то з виразу (38) отримуємо наступний результат

$$S = \frac{1}{2} (1-k) (m_0 + m_-) (V_1 - V_2). \quad (50)$$

За непружного удару, коли обидва віруси злипаються і рухаються удвох, швидкість визначається, як

$$u = \frac{m_B (V_1 + V_2)}{2m_B} = \frac{V_1 + V_2}{2}, \quad (51)$$

а імпульс

$$S = \frac{m_B}{2} (V_1 - V_2). \quad (52)$$

За абсолютно пружного удару модуль ударного імпульсу, який прикладається до кожного тіла за весь період удару, приймає вид

$$S = m_B (V_1 - V_2). \quad (53)$$

Звідсіля маємо висновок: за умови абсолютно пружного удару ударний імпульс вдвічі більший, ніж при непружному. Це пояснюється тим, що за абсолютно пружного удару до імпульсу фази деформації додається імпульс фази відновлення такого ж модуля.

Зазвичай зіткнення двох часточок (вірусів) не є прямим, а відбувається під певним кутом. Як наслідок такого зіткнення, швидкість обертання вірусу змінюється на величину

$$\omega - \omega_0 = \frac{S_x^E}{m_B d}, \quad (54)$$

де S_x^E – проєкція вектору ударного імпульсу на вісь O_x , d – відстань від точки удару до центра мас вірусу. Координати удару визначаються, як

$$Z_K = \frac{I_z}{m_B d}; \quad y_K = \frac{I_{yz}}{m_B d}. \quad (55)$$

Це доводить, що окрім поступового броунівського руху існує і оберталине, який характеризується кутом Ойлера. Цей кут θ характеризує кут повороту вірусу за час t .

Середнє значення квадрату $\sin \theta$ можна отримати як

$$\overline{\sin^2 \theta} = \frac{2}{3} (1 - e^{-6Dt}), \quad (56)$$

де коефіцієнт обертальної дифузії

$$D = \frac{kT}{8\pi\eta\chi_6^3}, \quad (57)$$

де η – в'язкість середовища.

Теорія квантової механіки надає можливість визначити кут розсіяння [11, 12]. Сутність моделі у цьому випадку полягає у принципах звичайного масштабування. Отже, якщо вірус стикається з

групою вірусів масою M , що знаходиться у стані спокою до зіткнення, у який потрапляє вірус з масою m_b та швидкістю V_0 , то кінетична енергія обох часток

$$E_0 = \frac{mV_0^2}{2}, \quad (58)$$

а швидкість руху буде становити

$$V_0 = \frac{\sqrt{2m_b E_0}}{M + m_b}. \quad (59)$$

У системі кінетична енергія відносного руху обох часток

$$E = E_0 \frac{M}{M + m_b}; \quad E = \frac{1}{2} E_0$$

при $M = m_b$. (60)

Оскільки енергія вірусу у системі після розсіяння пов'язана з її енергією до розсіяння

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{M^2 + m_b^2 + 2Mm_b \cos \theta}{(M + m_b)^2}, \quad (61)$$

де $E_{1, \min} = \frac{(M - m_b)^2}{(M + m_b)^2} E_0$ при $\theta = \pi$, тобто за центрального удару.

Як наслідок, співвідношення між кутами розсіяння вірусу m_b , то

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &= \frac{M \sin \theta}{m_b + M \cos \theta}, \\ \cos \theta &= \frac{m_b + M \cos \theta}{\sqrt{m_b^2 + M^2 + 2m_b M \cos \theta}}. \end{aligned} \quad (62)$$

При співударі вірусів існує певна втрата ними кінетичної енергії, яка визначається теоремою Карно, що має наступний вигляд

$$T_0 - T = \frac{1 - k}{1 + k} T^*, \quad (63)$$

де $T^* = \frac{1}{2} m_b (V_1 - u_1)^2 + \frac{1}{2} m_b (V_2 - u_2)^2$, T_0

T_0 – початкова кінетична енергія вірусів, T – кінетична енергія після удару. За пружного удару (при $k > 1$) вираз (63) перетворюється на

$$T_0 - T = (1 - k^2) \frac{m_b}{4} (V_1 - V_2)^2. \quad (64)$$

Отже, внаслідок цілої низки рухів та зіткнень вірус як фізичне тіло втрачає свою енергію. Як наслідок значно втрачається швидкість за рівняннями броунівського руху [1]. Тим не менш, оскільки ми розглядали термодинамічну замкнену систему, то загальна кількість руху дрібнодисперсних об'єктів таких, як вірус, повинна мати сталу величину [1].

Таким чином, тіло вірусу знаходиться у стані спокою. Як наслідок, енергетика цих сил є різною. Частина з них призводить до коливань стосовно нерухомого центру і у різних напрямках векторна діаграма яких утворює сферу.

Друга група сил має відносно спрямований напрямок, який призводить до орієнтовного

спотворення загальної діаграми. Такими силами, що утворюються зонами присутності сторонніми об'єктами, що мають потужні силові поля, як то гравітаційне, електричне або атомарне.

Ці поля є статистично діючими відносно центру мас. За своєю фізичною сутністю це поля, які пронизують геть усі можливі структури, неметалевого походження. Звичайно на першому місці знаходяться гравітаційні поля, які реагують на масу тіла. На другому ми маємо електричні поля, і на третьому - атомарні.

Стосовно вірусу, який перебуває у повітряному середовищі, необхідно визначити гравітаційні та електричні сили як постійно діючі. Атомарні сили (Ван-дер-Ваальса), хоч і є досить потужними, але вони є близькодійючими, тобто у молекулярних межах.

Отже, якщо вірус перебуває у рівномірному середовищі, то на нього діють лише сили тяжіння та електростатики. При наближенні до поверхні сили тяжіння відіграють дуже невелику роль у загальній складовій. Більшу роль відіграють електростатичні сили Кулона та атомарні Ван-дер-Ваальса. Особливо це відчувається, коли вірус знаходиться у безпосередній близькості до поверхні. Ефект взаємного притягання різко посилюється, якщо поверхня вкрита шаром вологи. Подібна ситуація була розглянута у [13], а тому розглянемо лише часткове застосування стосовно нашої задачі. Таким чином, серед усіх сил, які призводять вірус до руху, залишаємо до розгляду лише три. Це електростатичні, аерогідронамічні та атомарні. Таким чином результуюча сила F_Σ матиме наступний вигляд

$$F_\Sigma = F_e + F_{\text{АГД}} - F_{\text{ВВ}}, \quad (65)$$

де F_e – електростатична або кулонівська сила, $F_{\text{АГД}}$ – комплекс аерогідродинамічних сил, $F_{\text{ВВ}}$ – атомарні сили Ван-дер-Ваальса.

На першому за своєю дією силою є сила кулонівської взаємодії, яка у вільному просторі поводить себе як біокосний об'єкт [13]. Заряд такої частки дрібної твердотільної зони присутності q_b можна визначити через елементарний заряд електрона як

$$q_b = ne, \quad (66)$$

де n – кількість електронів, $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрона.

Вірус як фізичний об'єкт може рухатися лише за дією сили, що утворює електричне поле. Уявимо, що основою для нашої моделі є площина. У такому разі напруженість поля визначається

$$E = \frac{1}{2\epsilon_c \epsilon_0} \sigma, \quad (67)$$

де ϵ_0 – діелектрична стала, ϵ_c – діелектрична проникність середовища, σ – щільність поверхневого заряду.

Стосовно біологічних об'єктів необхідно зауважити, що вони мають властивість виробляти електричні заряди. Так наприклад тіло людини виробляє від 1 до 3 $\mu\text{Кл}$, але відомі випадки і більш потужних зарядів. Оскільки сила, діюча на вірус, визначається, як

$$F_B = q_B E, \quad (68)$$

то, як наслідок, отримуємо

$$F_B = \frac{q_B \tau}{2 \epsilon_c \epsilon_0}. \quad (69)$$

У випадку взаємодії двох вірусів із зарядом q_B на відстані l визначається законом Кулона

$$F_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_c\epsilon_0} \frac{q_B^2}{l^2}. \quad (70)$$

Отже за умови, що $E_x = E$, $E_y = E_z = 0$, $B = 0$, $V_x = V_0$, $V_y = V_z = 0$, рівняння руху отримує вигляд

$$m_B \frac{d^2 x}{dt^2} = -q_B E. \quad (71)$$

При вирішенні рівняння отримуємо плинну координату

$$x(t) = V_0 t - \frac{q_B}{2m_B} E t^2, \quad y(t) = z(t) = 0 \quad (72)$$

при швидкості

$$V_x(t) = V_0 - \frac{q_B}{2m_B} E t, \quad V_y(t) = V_z(t) = 0. \quad (73)$$

Аналогічно (71) можна вирішити рівняння руху за іншими координатними вісями. Але водночас, за однією з координат рух вірусу матиме параболічний вигляд, який має наступний опис

$$y(t) = \frac{q_B}{2m_B} \frac{x^2}{V_0^2} E. \quad (74)$$

При швидкостях за координатами

$$V_x(t) = V_0, \quad V_y(t) = -\frac{q_B}{m_B} E t, \quad V_z(t) = 0. \quad (75)$$

Отже, якщо нема інших сторонніх сил, вірус буде рухатися по нормалі до поверхні об'єкту. Мало того, коли він торкнеться поверхні, то займе таку позицію, коли всі електричні сили будуть врівноважені. При цьому всі віруси повинні рівномірно розташовуватися при поверхні завдяки своїм електричним зарядам, утворюючи шар товщиною в один діаметр вірусу. Суто принципово такий процес не має закінчення, оскільки за теоремою Ірншоу він є нескінченим. Кулонівські сили завжди діють за нормаллю до поверхні об'єкту, в той час як аерогідродинамічні не мають чітко спрямованого напрямку. Під середовищем необхідно розуміти повітря або рідину. У будь-якому випадку сили, які вони створюють під час свого руху у приповерхневому шарі, мають тангенціальний або турбулентний рух. Як наслідок, утворюється рух вірусу уперек

електростатичної сили, і рух вірусу відбувається за траєкторією, яка має опис через (74).

Самі по собі аерогідродинамічні сили являють собою об'єднання низки сил, тобто для аерогідродинамічних сил

$$\mathbf{F}_\Sigma = \mathbf{F}_{AG} + \mathbf{F}_0 + \mathbf{F}_A + \mathbf{F}_M, \quad (76)$$

де складовими є аерогідродинамічні сили, сила опору середовища, сила Архімеда, сила ефекту Магнуса.

Отже, сила Ньютона не залежить від розташування у просторі поверхні біологічного об'єкту, оскільки вона завжди спрямована на центр земної кулі, хоча маса самого об'єкта теж утворює вектор тяжіння, спрямований у бік центру маси вірусу. При цьому постійна швидкість досягається тоді, коли сила тяжіння дорівнює сили опору середовища F_0 , тобто

$$F_0 = \eta S d_c \frac{V_0^2}{2g}, \quad (77)$$

де η – коефіцієнт опору середовища, S – проекція поперечного перерізу панданної зони вірусу, d_c – питома вага середовища.

При цьому, сила ваги за винятком архимедових сил визначається, як

$$P = \frac{\pi D_B^3}{6} (d_B - d_c), \quad (78)$$

де d_B – питома вага вірусу.

При досягненні сталої швидкості

$$F_0 = P. \quad (79)$$

Якщо знехтувати силами інерції, орієнтуючись лише на тертя, то сила опору буде

$$F_0 = 3\pi D_B \mu V_0. \quad (80)$$

Отже, якщо вірус знаходиться під дією аеро- або гідростатичного тиску, то ця сила визначиться, як

$$F_{AG} = \text{grad } P. \quad (81)$$

При цьому градієнт скаляра визначається, як гамільтоніан потенційного поля.

У окремому випадку сили тяжіння

$$F_{AG} = d_c g, \quad (82)$$

де d_c – густина середовища, g – прискорення вільного падіння.

Водночас, на тіло діє відштовхувальна сила Архімеда

$$F_A = Q_B d_c g, \quad (83)$$

де Q_B – об'єм середовища, який витискає вірус.

Для вірусу діаметром D_B сила становитиме

$$F_B = \frac{1}{3} \pi h \left(\frac{3}{2} D_B - h \right), \quad (84)$$

де h – глибина занурення.

Отже, якщо на вірус діють сили, то рух у середовищі викликає появу ефекту Магнуса, суть якого є обертання навколо вісі під дією зустрічного потоку. У такому випадку сила

Магнуса F_M визначається як циркуляція вектора швидкості середовища навколо вірусу, тобто

$$F_M = -d_c \Gamma \times u, \quad (85)$$

де Γ – циркуляція вектору швидкості, u – швидкість потоку в нескінченності.

Оскільки моделю вірусу у нас є кулька, то

$$F_M = \frac{1}{8} d_c V D_b G, \quad (86)$$

де G – коефіцієнт підйомної сили.

Після контакту вірусу з поверхнею в дію вступають атомарні сили Ван-дер-Ваальса. Ці сили мають наступні три складові

$$F_{BB} = F_d + F_p + F_B, \quad (87)$$

де F_d – сила міжмолекулярної взаємодії, F_p – сила тяжіння, F_B – сила відштовхування.

Сила молекулярної взаємодії F_d визначається за наступним виразом

$$F_d = -\frac{3e^4 h v_0}{16\pi^2 \epsilon_0 k^2 \chi_M'}, \quad (88)$$

де e – заряд електрона, h – стала Планка, k – хвильове число, v – частота осцилятора, χ_M – відстань між молекулами.

Ще одним типом зв'язку у силах Ван-дер-Ваальса є іонний, де загальна енергія зв'язку складається з двох: з енергії тяжіння E_p та енергії відштовхування E_B , тобто

$$E = E_p + E_B \quad (89)$$

$$E_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \chi_m^2} \quad (90)$$

$$E_B = \frac{B}{\chi_m^n}, \quad (91)$$

де B та n – сталі величини.

Як наслідок, сили, які продукують ці енергетичні поля, можна визначити як

$$F_p = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \chi_m^2}, \quad (92)$$

$$F_B = \frac{nB}{\chi_m^{n+1}}. \quad (93)$$

За підстановки (92) та (93) у (89) отримуємо

$$E = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \chi_0^{n-1}} \left(1 - \frac{1}{n}\right), \quad (94)$$

тобто енергію взаємодії іонів у молекулах.

Таким чином, попередній розгляд вказує на те, що вірус як фізичний об'єкт знаходиться під постійною дією різних сил на шляху від джерела до споживача.

На останньому етапі у приповерхневому шарі він гальмується, хоча назвати це повноцінним гальмуванням навряд чи можливо, оскільки при сталому імпульсі скорочується довжина вільного пробігу. У приповерхневому шарі потік середовища має турбулентне обтікання поверхні.

При віддаленні від поверхні потік стає все більш ламінарним. Тоді поверхня об'єкту має певну нерівність, моделювання якої описано в роботі [3]. При товщині мікропанданної зони у половину діаметра атома рух вірусу в потоці стає схожим на ламінарний потік повітря. Для ідеального за формою вірусу – це рухомий прошарок, коли всі об'єкти приповерхневої зони рухаються з однаковою кутовою швидкістю. У такому випадку рівняння нерозривності потоку для несталого руху середовища може мати опис у диференціальній формі, як

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot V_z)}{\partial z} = 0. \quad (95)$$

Як наслідок, за сталої щільності та за сталого стану руху ми отримуємо рівняння Ойлера

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial V_x}{\partial x} &= -\frac{\partial \rho}{\partial x} \\ \rho \frac{\partial V_y}{\partial y} &= -\frac{\partial \rho}{\partial y} \\ \rho \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\rho g - \frac{\partial \rho}{\partial z} \end{aligned} \quad (96)$$

Тим не менш, рівняння (96) не надають можливості враховувати сили в'язкості, тиску, ваги, тертя стискання та розтягування. Як наслідок до рівнянь (96) додається низка членів тогожних впливу цих сил. Таким чином ми отримуємо диференціальні рівняння Нав'є-Стокса наступного виду

$$\begin{aligned} \rho \frac{AV_x}{dt} &= -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \left(\nabla^2 V_x + \frac{1}{3} \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right), \\ \rho \frac{AV_y}{dt} &= -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu \left(\nabla^2 V_y + \frac{1}{3} \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right), \\ \rho \frac{AV_z}{dt} &= -\rho g - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \left(\nabla^2 V_z + \frac{1}{3} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (97)$$

де

$$\begin{aligned} \frac{AV_x}{dt} &= \frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial V_x}{\partial x} V_x + \frac{\partial V_x}{\partial y} V_y + \frac{\partial V_x}{\partial z} V_z, \\ \frac{AV_y}{dt} &= \frac{\partial V_y}{\partial t} + \frac{\partial V_y}{\partial x} V_x + \frac{\partial V_y}{\partial y} V_y + \frac{\partial V_y}{\partial z} V_z, \\ \frac{AV_z}{dt} &= \frac{\partial V_z}{\partial t} + \frac{\partial V_z}{\partial x} V_x + \frac{\partial V_z}{\partial y} V_y + \frac{\partial V_z}{\partial z} V_z, \end{aligned} \quad (98)$$

при цьому ліві частини рівняння (97) є добуток маси одиниці об'єму ρ на її прискорення $\frac{AV}{dt}$,

тобто це є сила.

Добуток ρg відображає вплив сили ваги на рухому рідину. Частинні похідні $\frac{\partial \rho}{\partial x}$, $\frac{\partial \rho}{\partial y}$, $\frac{\partial \rho}{\partial z}$

показують на зміну тиску всередині потоку за відповідними координатами. Отже, отриманий

добуток $\mu \left(\nabla^2 V_x + \frac{1}{3} \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right)$ та відповідні осі u та z

вказують вплив сил тертя та сил стискання та

розтягування простору руху вірусу, які викликають сили тертя. Вирази $\nabla^2 V_x$, $\nabla^2 V_y$, $\nabla^2 V_z$ є операторами Лапласа і позначають суми других похідних від швидкості по всіх координат. Так, наприклад, для осі x маємо

$$\nabla^2 V_x = \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2}. \quad (99)$$

Частинні похідні $\frac{\partial \theta}{\partial x}$, $\frac{\partial \theta}{\partial y}$, $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ показують

швидкість зміни швидкості за вісями x, y, z під дією сил стискання та розтягання, тобто

$$\Theta = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z}. \quad (100)$$

Таким чином, якщо до системи рівнянь Нав'є-Стокса приєднати рівняння нерозривності потоку, то з математичного погляду ми маємо повний опис руху середовища, яке транспортує вірус. Проте вирішення рівнянь Нав'є-Стокса можливе лише у деяких окремих випадках.

Так, наприклад, якщо ми маємо довільно обрану одиницю об'єму (куб), у середині якого знаходиться наш вірус, то за рівномірного розташування часточок у просторі співвідношення їх об'єму до одиничного буде сталою величиною. Водночас, це співвідношення абсолютно незалежне від її форми та одиниці об'єму. Найпростіший приклад – це куля, яка знаходиться у кубі. Співвідношення об'ємів у такому випадку

дорівнює $\frac{\pi}{6}$ незалежно від розташування у просторі обраного об'єму. Окрім того, рух часточки у межах одиничного об'єму буде визначати межу панданної зони вірусу за обраного способу руху.

Але вірус не може весь час знаходитися у межах одиничного об'єму і весь час буде намагатися покинути його. Як наслідок, він стискається з іншими вірусами, утворюючи певні угруповання, які намагаються прилипнути до поверхні об'єкта. Одночасно з цим необхідно підкреслити, що це вимагає одночасного руху всіх вірусів в одному напрямку. Однак така сукупність об'ємів вірусів створює відповідний потік у середовищі. З такого опису теорії руху маємо визначений рух маси, кількість руху та сили, які діють у середовищі. Особливо сили руху середовища виказують себе у приповерхневому шарі, коли в процес формування потоку втручається панданна зона об'єкту.

Максимального значення ці явища набувають при малих відстанях від вірусу до поверхні, коли розмір щілини можна порівняти з діаметром вірусу. У цьому випадку починають діяти різні гідро та аеродинамічні ефекти, як наприклад ефект Магнуса. Як наслідок дії усіх цих сил, вірус не тільки ударяється об поверхню, але і

притискається до неї так, що може розпочати свою руйнівну дію. При такому торканні він може зробити кілька стрибків, поки не заспокоїться.

Таким чином, можна визначити з урахуванням формотворення вірусного об'єкту особливості його динамічного розповсюдження у просторово-часових координатах.

Висновки

Отже, проведено дослідження щодо проходження потоків вірусів скрізь навколишнє середовище, що визначає присутність певного об'єкта, який утворює ці потоки, показало особливості розповсюдження вірусу в панданній зоні об'єкта, при визначенні геометричних особливостей потоків вірусів та характеру їх взаємодії з іншими об'єктами та матеріальними частинками в сукупності потоків.

На цьому обґрунтовано аналітичну модель розповсюдження потоків вірусних об'єктів як потоків матеріальних частинок у просторово-часових координатах. Отже, визначено основні особливості такого руху в приповерхневих середовищах об'єкту та на віддаленні від нього.

У подальших дослідженнях фантомна модель розповсюдження потоків вірусних об'єктів у просторі потребує моделювання руху та торкання поверхні об'єкта на рівні різних типів торкання залежно від стану їх взаємодії.

Література

- [1] В. І. Скицюк, Т. Р. Ключко, “Фантомна модель розповсюдження вірусних об'єктів при пандемії. Частина 1”, *Вісник КПІ. Серія Приладобудування*, Вип. 59(1), с. 109-117, 2020. DOI: 10.20535/1970.59(1).2020.210038.
- [2] V. I. Skytsiuk, T. R. Klotchko, “Determination of the coordinates of the pathological zones in the mass of the biological object”, *Microwave & Telecommunication Technology, (IEEE Xplore)*, vol. 2, 1083-1084, 2013.
- [3] Д. А. Нешумаев, Е. Н. Сухарев, В. Л. Стасенко, “Математическое моделирование эпидемического и биологических процессов ВИЧ-инфекции”, *ВИЧ-инфекция и иммуносупрессии*, Том 9, № 2, pp. 58-67, 2017. DOI: [10.22328/2077-9828-2017-9-2-58-67](https://doi.org/10.22328/2077-9828-2017-9-2-58-67)
- [3] Glenn E. Lahodny Jr., Linda J. S. Allen, “Probability of a disease outbreak in stochastic multipatch epidemic models”, *Bulletin of mathematical biology*, 75(7), pp. 1157-80, 2013 Jul. DOI: 10.1007/s11538-013-9848-z.
- [4] M. Roberts, V. Andreasen, A. Lloyd, L. Pellis, ‘Nine challenges for deterministic epidemic models’, *Epidemics*, Mar 1; 10:49–53, 2015
- [5] Brauer, Fred, and Carlos Castillo-Chavez, *Mathematical models in population biology and epidemiology*, vol. 40. New York: Springer, 2012.

- [6] И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. *Справочник по математике*. Москва, СССР: Наука, 1967.
- [7] Richard Feynman. *The character of physical law, A series of lectures recorded by the BBC at Cornell University USA*, Cox and Wyman LTD London, 1965.
- [8] Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк, Т. Р. Ключко, *Теорія біотехнічних об'єктів. Том 2. Динаміка польових взаємодій об'єктів*. Київ, Україна: ТОВ «Інтердрук», 2017.
- [9] Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.britannica.com/science/coronavirus-virus-group>
- [10] М. А. Павловський *Теоретична механіка: підручник*. Київ, Україна: Техніка, 2002. – 512 с.
- [11] В. Е. Кузмичев, *Законы и формулы физики*. Київ, СРСР: Наук. думка, 1989.
- [12] Л. А. Булавін, Д. А. Гаврюшенко. *Молекулярна фізика: Підручник*. Київ, Україна: ЗНАННЯ, 2006.
- [13] Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк, Т. Р. Ключко, *Теорія біотехнічних об'єктів. Том 1. Узагальнені властивості біотехнічного об'єкта*. Київ, Україна: НТУУ"КПІ", ВПК "Політехніка", 2016.

УДК 621.9008:620.179

В. І. Скицюк, Т. Р. Ключко*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина***ФАНТОМНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИРУСНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПАНДЕМИИ. ЧАСТЬ 2**

Вступлення. Предварительное рассмотрение проблемы распространения вирусов в пространстве авторами [1], доказывает, что характер движения вирусов зависит от особенностей формообразования этих объектов, а потому были определены основные аспекты зависимости геометрических размеров зоны присутствия объектов при взаимодействии с другими объектами, в том числе на полевом уровне. Поскольку исследования проводились в предположении о формализации идеальной структуры зоны присутствия (распространения) материальных частиц, актуальность дальнейшего исследования подтверждается требованиями к необходимости определения реальных размеров потоков.

Результаты исследования. Основной целью данного исследования было продолжение создания модели распространения вирусов как материальных частиц в окружающем пространстве. В результате аналитического моделирования особенностей характера распространения тела вируса в окружающей среде показано, что вирус как физический объект находится под постоянным воздействием различных сил на пути от источника к потребителю. На последнем этапе в приповерхностном слое он тормозится, хотя назвать это полноценным торможением вряд ли возможно, поскольку при постоянном импульсе сокращается длина свободного пробега. В приповерхностном слое поток среды имеет турбулентное обтекание поверхности. На основании проведенного исследования определено, что именно геометрическая форма, а точнее его фантом, играют основную роль при его движении в среде. Таким образом, моделирование движения частиц в пространстве показало, что как физический объект вирус не может образовывать жесткую ситуацию удара, поскольку имеет достаточно большую панданную зону от рецепторов объекта. Панданная зона вируса имеет ряд разреженных рецепторов, которые значительно смягчают удар.

Выводы. Итак, рассмотрены особенности распространения потока вирусов в окружающей среде при наличии определенных условий взаимодействия объектов. Обоснована аналитическая модель распространения потоков вирусных объектов как потоков материальных частиц в пространственно-временных координатах и определены основные особенности такого движения в приповерхностных средах объекта и на удалении от него.

В дальнейших исследованиях фантомная модель распространения потоков вирусных объектов в пространстве требует моделирования движения, и касания поверхности объекта на уровне различных типов касания в зависимости от состояния их взаимодействия.

Ключевые слова: панданная зона; зона присутствия; поток вирусов; распространение.

V. I. Skytsiuk, T. R. Klotchko*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine***PHANTOM MODEL OF DISTRIBUTION OF VIRAL OBJECTS IN A PANDEMIC. PART 2**

Introduction. Preliminary consideration of the problem of the spread of viruses in space, studied by the authors [1], proves that the nature of their movement depends on the shape of these objects, and therefore the main aspects of the geometric dimensions of object's presence area in interaction with other objects projects, including at the field level. Since the research was conducted under the assumption of formalizing the ideal structure of presence zone of

(distribution) of material particles, the relevance of further research by the requirements for the need to determine the actual size of the flows is confirmed.

Research results. The main purpose of this study was to continue to create a model for the spread of viruses as material particles in the surrounding space. As a result of analytical modeling of the nature of the spread of the body of the virus in the environment, it is shown that the virus as a physical object is under the constant action of various forces on the way from source to consumer. At the last stage, it is inhibited in the near-surface layer, although it is hardly possible to call it a full-fledged inhibition, because at a constant pulse the free path length is reduced. In the near-surface layer, the flow of the medium has a turbulent flow around the surface. Based on the study, it was determined that the geometric shape, or rather its phantom, play a major role in its movement in the environment. Thus, simulation of particle motion in space has shown that, as a physical object, a virus cannot form a rigid impact situation because it has a fairly large pandanus zone of receptors. The pandanus zone of the virus has a number of rarefied receptors that significantly soften the impact.

Conclusions. Thus, the peculiarities of the spread of the flow of viruses in the environment under the presence of certain conditions of interaction of objects are considered. The analytical model of the propagation of fluxes of viral objects as streams of material particles in space-time coordinates is substantiated and the main features of such motion in the near-surface environments of the object and at a distance from it are determined.

In further research, the phantom model of the propagation of streams of viral objects in space requires modeling of motion and touching the surface of the object at the level of different types of touching, depending on the state of their interaction.

Key words: Pandan zone; Presence area; flow of viruses; dissemination.

*Надійшла до редакції
12 вересня 2020 року*

*Рецензовано
25 жовтня 2020 року*