

ГІПОТЕЗИ. НЕСТАНДАРТНІ МЕТОДИ РІШЕННЯ НАУКОВИХ ТА ІНЖЕНЕРНИХ ПРОБЛЕМ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 621: 514.83

ФАНТОМНА МОДЕЛЬ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ВІРУСНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ПАНДЕМІЇ. ЧАСТИНА 1

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. У статті йдеться про дослідження розповсюдження матеріальних частинок, як віруси, у просторі, визначення їх розмірних особливостей. Сучасна медицина стикається з проблемою діагностики інфекційних захворювань, а також визначення місця виникнення та характеру утворення вірусів, їх будови та характеру взаємодії з живими організмами. Ці проблеми уникнення пандемії є першорядними. Актуальність дослідження підтверджується необхідними вимогами до підвищення точності визначення реальних розмірів потоків.

Результати дослідження. Основною метою цього дослідження було створення моделі розповсюдження вірусів як матеріальних об'єктів у просторі, тобто геометричних параметрів їх зон присутності. Визначено загальну залежність кількості вірусів, які має можливість дифундувати у навколишній простір. Окрім того, створено модель визначення консервативних полів, які мають властивість силової дії, що співпадає з напрямком векторного поля. Водночас, польові структури материнського тіла можуть спотворюватися при взаємодії з полями інших материнських тіл та об'єктів. Отже, визначено розмір зони присутності вірусів у просторі навколо материнського тіла, тобто можливість визначитися з величиною радіуса, який окреслює зовнішній контур зони вірусної присутності.

Висновки. Отже, розглянуто особливості розповсюдження потоку вірусів у навколишньому просторі за ідеальних умов. Таким чином, обгрунтовано аналітичну фантомну модель розповсюдження потоку матеріальних частинок як абстрактних об'єктів. Запропоновано досліджувати аспекти утворення та поведінку вірусних потоків у просторово-часових координатах..

Ключові слова: фантом; моделювання; потік частинок; розповсюдження потоку.

Вступ

На сьогодні всім широко відомо, що таке вірусна пандемія. Сучасна медицина стикається з проблемою діагностики інфекційних захворювань, а також визначення місця виникнення та характеру утворення вірусів, їх будови та характеру взаємодії з живими організмами. Ці проблеми уникнення пандемії є першорядними. Сам по собі цей процес з погляду звичайної медицини має досить заангажований вигляд, який ґрунтується на тому, що віруси або бактерії розповсюджуються повітряно-крапельним шляхом, або через безпосереднє торкання об'єкту носія вірусу. Відомо, що основним методом зараження є проникнення вірусу в живу клітину та формування патологічного спотворення об'єкта біологічної структури, оскільки віруси здатні жити та розмножуватися лише в клітинах інших організмів. У зовнішньому середовищі вони не виявляють жодних ознак життя.

Наразі опис процесу зараження [1, 2] як такого є у математичній епідеміології. Така ситуація, яка з огляду на класичну фізику має доволі гарний опис, тим не менш має повну відсутність математичного

опису як такого. Існує кілька моделей [2, 3, 4] щодо поширення вірусних інфекцій, але вони здебільшого враховують параметр шляху від джерела зараження до ураженого об'єкта. Але просторові параметри траєкторії поширення вірусу є важливими, оскільки вони дозволяють змінювати просторові координати місця розташування об'єкта, щоб уникнути зараження. З іншого боку, якщо вірусну пандемію розглядати як суто фізичне явище, то воно досить добре піддається опису з огляду на поняття зони присутності абстрактного об'єкту [5, 6], засади технології ТОНТОР та класичної фізики [7, 8] мають досить гарний математичний опис. Раніше авторами було описано процес визначення просторових координат зони присутності патологічного об'єкта в масі живого організму [9]. Тому надалі будемо користуватися саме цими джерелами для побудови фантомної моделі вірусної пандемії.

Постановка задачі

Для того, щоб вирішити задачу побудови моделі вірусної пандемії, необхідно з'ясувати складові цього явища як абстрактного фізичного

об'єкту та їх властивості. Водночас, у процесі пандемії необхідно з'ясувати термінологію, оскільки існує суттєва різниця між фізичними та медичними поняттями. Надалі для спрощення розгляду будемо приймати найбільш оптимальні назви з погляду фізики, тобто матеріальна точка або тіло та інші.

Таким чином, нам необхідно розглянути наступні фізико-біологічні об'єкти, які надають нам явище пандемії. По-перше, це джерело, яке продукує основний носій пандемії-вірус. По-друге, вірус як безпосередній носій властивостей пандемії. По-третє, основні принципи зони присутності джерела вірусів при створенні польової структури пандемії. По-четверте, механіка руху вірусу в просторі від джерела до споживання. По-п'яте, процес входження вірусу в живу клітину.

Деякі питання, які належать до категорії вірусології, ми розглядати не будемо, оскільки це справа конкретних фахівців. Наразі підкреслюємо, що всі явища, які ми будемо розглядати стосовно пандемії, хоч і мають суто біологічний характер, досить добре піддаються математичній обробці як абстрактні об'єкти.

Виходячи з проблем, які описані, основною метою цього дослідження було створення моделі розповсюдження вірусів як матеріальних об'єктів у просторі, тобто геометричних параметрів їх зон присутності.

Засади моделювання простору розповсюдження частинок

Отже, розглянемо джерело як базу продукування вірусів. На сьогодні не існує єдиної прийнятної теорії стосовно генези вірусів. Наразі вірусологія виділяє три гіпотези стосовно їх походження. Такими гіпотезами є регресивна, клітинного походження та коеволуцій. Кожна з них має своїх прихильників та супротивників, а тому не має причин зосереджуватися на цій темі. Наразі абстрагуючи цей об'єкт, будемо сприймати його як кулю, з поверхні якої йде потік вірусів. Така модель розглядалася у [7], але за інших процесів.

За цією моделлю ми маємо кулю, поверхня якої може складатися з проєкцій кулястих вірусів на її поверхню. Тобто, оскільки куля має опис через ірраціональні числа (π), то, застосовуючи функцію антьє, можемо визначити миттєву кількість вірусів (n), які може спродувати материнське тіло на визначений момент одночасно, отже

$$n = E \left[\frac{\pi D_M^2}{d_B^2} \right], \quad (1)$$

де E – функція антьє, D_M – діаметр материнського тіла, d_B – діаметр вірусу.

Звісно, що ця кількість вірусів є дуже велика, до того ж, узагальнення поведінки цієї маси

дозволяє нехтувати дискретністю аж до величин Ξ та $[S]$. Наразі за певних спрощень потік вірусів можна розглядати як потік корпускулів. Наразі такий потік можна характеризувати низкою наступних параметрів. По-перше, це загальна маса кількості вірусів $m_e \cdot n$. За кожного моменту відділення n -вірусів від материнської маси M у нас залишається $M - m_e \cdot n$. З іншого боку, материнська маса, хоч і має постійне підживлення, тим не менш, ми його не будемо враховувати. Отже, маса вірусів, яка полишає материнське тіло, створює потік у вигляді

$$d_p = \frac{m_e \cdot n}{dSdt}, \quad (2)$$

де dS – елементарна площа.

Цей потік можна характеризувати енергією

$$E_e = \frac{m_e \cdot n \langle V^2 \rangle}{2} \quad (3)$$

та інтенсивністю потоку вірусів

$$I = \frac{n \cdot m_e \langle V^2 \rangle}{2S}. \quad (4)$$

Якщо ми розглядаємо вірус як елементарну корпускуляцію, то це вимагає середню швидкість $\langle V \rangle$ та довжину пробігу між співударями, яка визначається за виразом [7, 8]

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2C} \cdot d_e^2}. \quad (5)$$

Введемо деякі зауваження, а саме: надалі сприймаємо назву абстрактного вірусного тіла не тіло – хазяїна, а материнське тіло. Причина такого рішення наступна: під словом хазяїн (господар) завжди малось на увазі керування об'єктом, а під словом материнство – народження нових об'єктів. Наразі маємо народження, оскільки хазяїн на це не здатен. Навіть у фізиці існує поняття матеріальної точки, а не хазяйської.

Отже, якщо кожний вірус має певну вагову функцію σ , яка має опис через модель СЕМЧ (силова електромагнітна частка), то на поверхні материнського тіла їх може бути розташовано n -штук і, як наслідок, загальний потенціал вагової функції у такому випадку буде складати $n m_e$. Можлива миттєва потужність потоку P материнського тіла водночас визначається за виразом

$$P = \frac{m_e}{d_e^2}, \quad (6)$$

де m_e – вагова функція вірусу материнського тіла на поверхні.

Отже, материнській потік вірусів утворює навколо нього польову зону присутності [5]. За градаціями зони присутності та фізичними властивостями віруси повинні розглядатися як тверді часточки [1] та мати форму віріона і не є живою істотою, тобто маємо повне право розглядати його як тверду часточку [6]. По-друге,

це умовно статичні поля. Під цим необхідно розуміти поля, які не можуть існувати без абстрактних об'єктів, які їх виробляють. За третім зауваженням, це поля, що мають властивість самопідтримки. Так, наприклад, якщо об'єкт потрапляє у це поле та інфікується, то він сам стає об'єктом підтримки вірусного поля.

Оскільки ми прийняли модель материнського тіла у вигляді кулі, то поле матиме центрально-симетричний характер, тобто це пласке поле, яке не залежить від координати Z

$$P = P(x, y), \quad (7)$$

тобто це пласке поле, розвиток якого відбувається виключно у площині.

По-друге, це циліндричне або осьове поле, яке має опис

$$P = P(\sqrt{x^2 + y^2}). \quad (8)$$

У цьому випадку функція P залежна лише від відстані до вісі Z і є характерними для об'єктів циліндричної форми. У нашому випадку це є центральносиметричне джерело, яке випромінює польові структури за принципом

$$P = P(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}). \quad (9)$$

Окрім того, консервативні поля мають властивість силової дії, яка співпадає з напрямком векторного поля. Польові структури материнського тіла можуть спотворюватися при взаємодії з полями інших материнських тіл та об'єктів.

Таким чином, згідно сказаного вище, для плаского векторного поля отримуємо

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}(x, y), \quad \mathbf{V}_z = 0. \quad (10)$$

При цьому \mathbf{V} є незалежним від Z , а вектори $\mathbf{V}(x, y)$ знаходяться у площині (x, y) або паралельній їй.

Для циліндричного векторного поля маємо вираз

$$\mathbf{V} = F(\rho)\mathbf{r}, \quad \rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}. \quad (11)$$

Наразі таке поле можуть мати деякі з вірусів, які мають форму палички. Сферичне векторне поле, яке притаманне об'єктам кулястої форми, також у нашому випадку є материнське тіло та кулясті віруси. Властивості силового векторного поля мають наступний опис

$$\mathbf{V} = F(\rho)\mathbf{r}, \quad \rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad \mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}. \quad (12)$$

Оскільки об'єкт моделі має закінчену кулясту форму, то потік вірусів у зовнішній простір має вигляд як

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}(x, y, z). \quad (13)$$

Таким чином, спираючись на вищевказане, ми маємо можливість сформулювати потенціал вірусної інфекції у просторі Φ_B , тобто

$$\Phi_B = \sum \frac{\sigma_0}{\mu \cdot \mathbf{r}} + \int_L \frac{\sigma^1 dl}{\mu \cdot \mathbf{r}} + \int_C \frac{\sigma^2 dS}{\mu \cdot \mathbf{r}} + \int_Q \frac{\sigma^3 dq}{\mu \cdot \mathbf{r}}. \quad (14)$$

У цьому виразі μ необхідно сприймати як здібність вірусу до проникнення через середовище, а \mathbf{r} є відстань до центра материнського тіла. Перший член виразу (10) надає опис того внеску, який робить материнське тіло у середовище, як носій вірусів.

Отже, вірус, який потрапляє у материнське тіло, розмножується за залежністю $\frac{k\Delta t}{\pi D_M^2}$ та інтервалом часу Δt . З іншого боку, маючи протидію від материнського тіла у вигляді $-\frac{v\Delta t}{\pi D_M^2}$, маємо затримку його розмноження.

Загальна залежність кількості вірусів, які дифундують у навколишній простір, визначається як

$$n = N_0 = \left(e^{\frac{k\Delta t}{\pi D_M^2}} - e^{-\frac{v\Delta t}{\pi D_M^2}} \right) \quad (15)$$

та їх маса

$$M_e = m_e N_0 = \left(e^{\frac{k\Delta t}{\pi D_M^2}} - e^{-\frac{v\Delta t}{\pi D_M^2}} \right). \quad (16)$$

У цих виразах сучинник k є сучинник швидкості утворення вірусів у материнському тілі, v – сучинник швидкості дифундування вірусів у навколишній простір.

Величина N_0 вказує на кількість клітин, які мають можливість утворювати віруси. Таким чином, перший член у виразі (14) набуває вигляду

$$\sum \frac{\sigma_0}{\mu \cdot \mathbf{r}} = \frac{N_0 \left(e^{\frac{k\Delta t}{\pi D_M^2}} - e^{-\frac{v\Delta t}{\pi D_M^2}} \right)}{\mu \cdot \mathbf{r}}. \quad (17)$$

Водночас, діаметр материнського тіла визначається як

$$D_M = d_e \sqrt{\frac{n}{\pi}}. \quad (18)$$

Надалі віруси залишають материнське тіло і потрапляють у зовнішнє середовище. Згідно біологічних досліджень віруси поза межами материнського тіла поведуться як неживе тіло, про що вже згадувалось раніше [1, 4]. Загальний розмір вірусів коливається у досить широких межах від 20 до 2000 нм [1], тобто на три порядки більше за найбільший атом, але, водночас, повністю підходять під категорію броунівських часточок [8]. У цьому випадку вірус під дією ударів молекул та інших вірусів має хаотичний рух у просторі навколо материнського тіла, створюючи навколо нього зону присутності. Отже згідно дослідних математичних відомостей

виявляється [8, 10], що такий рух є проявом внутрішнього руху речовини.

Таким чином, материнське тіло як джерело має наступні параметри. Оскільки нам відомий потік вірусів з виразу (6), то маємо можливість визначитися з дивергенцією, як основним параметром материнського джерела. Водночас, вважаємо, що вектор потоку вірусів спрямований приблизно за кутом $\frac{\pi}{4}$ до вектора номалі \mathbf{n} та тангенціального вектора τ . Як наслідок, отримуємо дивергенцію материнського тіла в наступному вигляді

$$\operatorname{div} \mathbf{M} = \frac{6 \cdot m_e}{\pi d_B^2 \cdot D_M^2}. \quad (19)$$

Циркуляція вектора потоку при цьому буде

$$\mathbf{\Omega} = \pi D_M. \quad (20)$$

При таких спрямованостях обов'язково буде турбулентний потік, який визначається як вихор функції материнського тіла

$$\operatorname{rot} \mathbf{M} = [\Delta \mathbf{M}]. \quad (21)$$

Траєкторія руху вірусу при цьому являє собою складну ламану лінію, яка утворюється від співударів молекул та вірусів один об одного. У вільному просторі без обмежень зміщення вірусу мають властивість приймати як позитивні, так і негативні значення. Як наслідок, середнє значення зміщення x визначається як

$$\langle x \rangle = 0. \quad (22)$$

Як наслідок, рух броунівської часточки або вірусу (22) можна характеризувати середнім квадратом зміщення $\langle x^2 \rangle$, який завжди має позитивне значення, а середнє значення $\langle x^2 \rangle \neq 0$. Звідсіля рівняння руху вірусів у зоні присутності материнського тіла для $\langle x^2 \rangle$ має вигляд

$$m_e \frac{d^2}{dt^2} \langle x^2 \rangle + \frac{1}{B} \frac{d}{dt} \langle x^2 \rangle - 2m_e \left\langle \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right\rangle = 0, \quad (23)$$

де m – маса вірусу; t – час.

Сучинник B – це сучинник рухомості вірусу, який пов'язує швидкість руху вірусу $v = \dot{x}$ з силою опору середовища F_c , в якому рухається часточка

$$v = \dot{x} = B F_c. \quad (24)$$

Якщо вірус має кулясту форму, то рухомість визначається за законом Стокса:

$$B = \frac{1}{3\pi\eta d_e}. \quad (25)$$

Звісно, що рухомість вірусу залежна від його лінійних розмірів і форми, а також від гливкості речовини η . У молекулярній фізиці доводиться, що

$$m_e \left\langle \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\rangle = \frac{2}{3} \frac{m \langle \mathbf{V}^2 \rangle}{2} = kT. \quad (26)$$

У такому випадку $m_e \langle v^2 \rangle / 2$ є середня кінетична енергія вірусу. Сучинник k у виразі (26) є стала Больцмана. Розв'язок рівняння (23) має вигляд

$$\left(\frac{d}{dt} \right) \langle x^2 \rangle = 2kTB \left[1 - e^{-\frac{t}{m_e B}} \right]. \quad (27)$$

Якщо час t поміж спостережень не досить велик, то експоненту можна не враховувати, але для кінцевих проміжків часу Δt маємо зміщення

$$\Delta \langle x^2 \rangle = 2kTB \Delta t. \quad (28)$$

Подальший рух вірусів маємо можливість розглядати як дифузійний, який має опис через закон Фіка [8]

$$dm_e = -D \frac{d\mathcal{N}}{dx} dS dt, \quad (29)$$

де D – сучинник дифузії, а $\frac{d\mathcal{N}}{dx}$ – градієнт щільності за однокоординатною функцією $\mathcal{N} = \mathcal{N}(x)$, dm_e – маса одного вірусного компонента який переноситься через площинку dS за час dt .

Водночас, маса вірусів M , яка переноситься за дифузійного процесу у бік зменшення щільності середовища ρ через площину S , визначається за формулою

$$M = -D \frac{\partial \rho}{\partial x} S. \quad (30)$$

Вся ця маса вірусів може переноситися при довжині вільного пробігу за виразом (5).

Сучинник дифузії може бути визначений за двома формулами. Згідно першої сучинник дифузії визначається за виразом

$$D = -\frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle, \quad (31)$$

де

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_e}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}} \quad (32)$$

є середня швидкість руху вірусу.

При цьому R – універсальна газова стала, а M_e – молярна стала вірусів.

За другим варіантом це

$$D = kTB. \quad (33)$$

У випадку стаціонарної дифузії за сталого потоку у трьох координатах

$$\frac{d\mathcal{N}}{dt} = \frac{d}{dx} \left(D \frac{d\mathcal{N}}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(D \frac{d\mathcal{N}}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(D \frac{d\mathcal{N}}{dz} \right). \quad (34)$$

Якщо сучинник дифузії не залежить від концентрації, то рівняння (28) спрощується

$$\frac{d\mathcal{N}}{dt} = D \Delta \mathcal{N}, \quad (35)$$

де Δ – оператор Лапласа

$$\Delta \mathcal{N} = \frac{\partial^2 \mathcal{N}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathcal{N}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathcal{N}}{\partial z^2}.$$

Материнське тіло визначає свою зону присутності через вірусну концентрацію у просторі. Розміри цієї зони визначає другий член у

рівнянні (14). Водночас, зона присутності материнського тіла може визначатися як функція ТОНТОР від щільності вірусного потоку

$$\Xi(I) = \int \frac{Idl}{\mu \cdot r}. \quad (36)$$

Визначення зони присутності материнського тіла відбувається за законом ТОНТОР про межі зони присутності тобто [5]

$$\left. \begin{aligned} T(T)Q_x &= \Xi Q_x \\ \bar{T}(\bar{T})Q_x &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (37)$$

Для визначення розмірів (радіусу) зони присутності використаємо поняття щільності потоку I , який є залежним від градієнту тиску ∇p зовнішнього середовища та градієнта температури ∇T , тобто

$$I = -Dn_0 \left(\nabla C + \frac{k_T}{T} \nabla T + \frac{k_p}{p} \nabla p \right), \quad (38)$$

де $n_0 = \frac{p}{kT}$, k – стала Больцмана, C – концентрація вірусів.

Наразі існує кілька прикладів розподілу концентрації вірусів [8] як маленької елементарної часточки. Так для напівнескінченного трубчастого простору для маси M , яка розташована у просторі, концентрація визначається як

$$C(x,t) = \frac{M}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}. \quad (39)$$

Звідсіля можна визначити відстань від материнського тіла, де зберігається рівень небезпечної концентрації при $C(x,y) = [S]$, яка визначається як

$$[x] = 2 \sqrt{Dt \ln \frac{M}{\pi Dt [S]}}. \quad (40)$$

Якщо розповсюдження вірусу відбувається у рідині, то визначення концентрації відбувається за виразом

$$C(r,t) = \frac{M}{8\sqrt[3]{\pi Dt}} e^{-\frac{r^2}{4Dt}}. \quad (41)$$

Звідкіля радіус небезпечної зони визначиться як

$$[r] = 2 \sqrt[3]{Dt \ln \frac{M}{8(\pi Dt)^{\frac{3}{2}} [S]}}. \quad (42)$$

Отже, розповсюдження вірусів у навколишньому середовищі є залежним від їх природи та від оточуючого середовища.

З першого погляду рух вірусу повинен був би відбуватися за нормаллю до зовнішнього фронту материнського тіла, тобто переднього фронту вірусної хвилі. Тим не менш, це не завжди так, достатньо розглянути реальні ситуації в оточуючому середовищі. Тобто ідеальні кола неможливі навіть за низки ідеальних умов. Тим не менш, задача визначення зони присутності вірусів залишається вельми проблематичною, а її вирішення нагальною проблемою сучасності.

Оскільки концентрація вірусів у просторі може бути різною, нам необхідно буде визначитися з двома зонами, на які розпадається основна первинна зона. Отже, первинна зона визначається за величиною Ξ , яка визначає загальну величину зони присутності вірусів як таких, тобто ми вважаємо, що за межами цієї зони вірусів немає. Це означає, що за її межами ми не можемо знайти віруси ні у який спосіб. Така зона вказує нам на можливі межі зараження об'єкту, якщо він потрапить у цю зону. Наступна зона – це зона гарантованого зараження, яка визначається величиною $[S]$, тобто гарантованого інфіціювання. За таких умов зовнішня зона Ξ завжди буде більше за внутрішню з межею у $[S]$. Отже, вирішимо цю задачу, користуючись розглянутими вище однокоординатними моделями.

Наразі нас цікавить розмір зони присутності вірусів у просторі навколо материнського тіла. Отже, навколо материнського тіла утворюється хмара вірусів, де їх концентрація визначається як тривимірна функція $C(x,y,z,t)$. Процес розповсюдження вірусів можна розглядати як процес дифузії від миттєвого крапкоподібного материнського тіла масою M у необмеженому просторі та часі. Такий процес дифузії має не ламінарний, а турбулентний характер, який має ефективний сучинник дифузії D . Така хмара вірусів розсмоктується, доки не зникає зовсім. Окрім того, це відбувається поступово, починаючи з периферії, де концентрація вірусів нижча за Ξ . За таких умов, якщо вважати, що хмара та джерело мають пристайні геометричні центри та координати, функцію концентрації, можна описати як вираз (39).

Визначитися із зоною присутності можна, якщо спиратися на певну характерну властивість вірусу, яка різко виділяється на загальному тлі середовища. Позначимо цю фантомну властивість як Φ . У такому випадку потужність властивості на обраній ділянці можна визначити як

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha l}, \quad (43)$$

де Φ_0 – первинна потужність материнського тіла дифузії вірусів, $\alpha = \alpha_0 C$ – сучинник розсіяння або поглинання, пропорційний концентрації вірусів ($\alpha_0 = Const$), C – концентрація вірусів прошарку, l – товщина прошарку.

Отже, якщо ми маємо два прошарки з різними товщинами l_1 та l_2 і різними концентраціями вірусів C_1 та C_2 , то

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha_0 C_1 l_1} \cdot e^{-\alpha_0 C_2 l_2} = \Phi_0 e^{-\alpha_0 (C_1 l_1 + C_2 l_2)}. \quad (44)$$

При цьому існує умова, що

$$\left. \begin{aligned} l_2 - l_1 &\geq [S] \\ C_2 - C_1 &\geq [S] \end{aligned} \right\}, \quad (45)$$

де $[S]$ визначає межу чутливості приладу до

концентрації вірусів.

Цілком зрозуміло, що зміна властивості відбувається за принципом

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha_0 \int C dl}. \quad (46)$$

Отже, визначення межі розповсюдження вірусів визначиться співвідношенням Φ/Φ_0 залежним від величини $\int C dl$. Отже, якщо ми приймаємо величину $[S]$ як поріг чутливості вимірального приладу, який реєструє фронт розповсюдження, то, як наслідок, отримуємо три випадки.

За першого випадку маємо співвідношення

$$\frac{\Phi - \Phi_0}{\Phi} < [S] \quad \text{або} \quad \frac{\Phi}{\Phi_0} > 1 - [S], \quad (47)$$

тобто зона фронту не реєструєма.

За другого випадку при

$$\frac{\Phi - \Phi_0}{\Phi} > 1 - [S] \quad \text{або} \quad \frac{\Phi}{\Phi_0} < [S] \quad (48)$$

ми маємо непевні відомості про розміри фронту.

За третього випадку

$$[S] < \frac{\Phi}{\Phi_0} < 1 - [S] \quad (49)$$

прилад лише частково реєструє зону присутності, тай тому, що вона має непевний характер у межах $[S]$, оскільки ступінь реєстрації величини Φ є залежною від співвідношення

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = e^{-\alpha_0 \int C dl}. \quad (50)$$

Якщо ми розглянемо проекції перерізів площин рівня об'ємної зони на площину (x, y) , то отримаємо відповідні проекції зон концентрації як низку концентричних кіл, які надають повне уявлення про цей процес.

Для визначення геометрії цих пристайних перерізів необхідно визначити інтеграл концентрації, користуючись виразом (39)

$$\begin{aligned} \int C dl &= \int_{-\infty}^{\infty} C(x, y, z, t) dz = \\ &= M \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \right)^3 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2+y^2+z^2}{4Dt}} dz = \\ &= M \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \right)^2 \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{4Dt}} \end{aligned} \quad (51)$$

Таким чином, якщо кількість вірусів у перерізі невелика, тобто

$$\int C dl > \frac{\Delta}{\alpha_0}, \quad \text{то} \quad \frac{\Phi}{\Phi_0} > 1 - [S], \quad (52)$$

то така ділянка відповідає відсутності вірусів. За великої кількості вірусів

$$\int C dl > \frac{\Delta}{\alpha_0}, \quad \text{то} \quad \frac{\Phi}{\Phi_0} < e^{-\Delta} = [S], \quad (53)$$

тобто за належного вибору $\Delta = \ln \frac{1}{[S]}$ відповідна

ділянка має відповідну потужність властивості Φ .

За умови, що $[S] \leq \int C dl < \frac{\Delta}{\alpha_0}$, отримуємо

$$\alpha_0 \int C dl = [S]$$

$$\text{або} \quad \alpha_0 M \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \right)^2 e^{-\frac{R^2}{4Dt}} = [S], \quad (54)$$

де $R^2 = x^2 + y^2$.

Вираз (54) визначає межу зони присутності вірусів, за якою вона стає нереєструємою. Отже, як наслідок, радіус вірусної зони присутності визначений із залежності (54) і становитиме

$$R = 2\sqrt{-Dt \ln \frac{[S] 4\pi Dt}{M \alpha_0}}, \quad (55)$$

а залежність відображена на рис. 1.

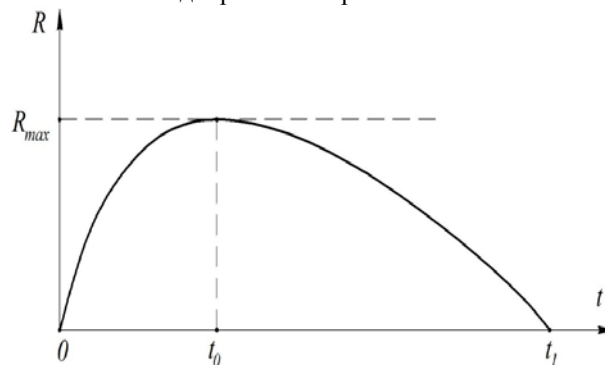


Рис. 1. Діаграма зміни радіусу зони присутності у часі

За малих значень t радіус зони присутності вірусів малий, але збільшується разом з t і при

$$t = t_0 = \frac{\alpha_0 M}{4\pi D t [S]} \quad (56)$$

приймає максимального значення

$$R_{\max} = 2\sqrt{Dt_0} = \sqrt{\frac{\alpha_0 M}{\pi e [S]}}. \quad (57)$$

При $t > t_0$ радіус зони присутності R зменшується через величину

$$t_1 = \frac{M \alpha_0}{4\pi D [S]} \quad (58)$$

дорівнює нулю, що відповідає злиттю зони присутності з загальним тілом у просторі.

Отже, дослідження процесу збільшення зони присутності надає можливість визначення сучиннику турбулентної дифузії D у вільному середовищі. Водночас, використовуються вирази для t_1 та t_0 .

Таким чином, сказане вище стосується лише уявних ситуацій дифузійних процесів на засадах цих теоретичних тез. У реальній ситуації ми

отримуємо не пристайні кола однакової концентрації, а замкнені криві неправильної форми. Мало того, вони мають яскраво окреслений хвильовий характер.

Оскільки нашою задачею є визначення контуру площі небезпечної концентрації вірусів, то необхідно звернути увагу на наступні параметри зони присутності вірусів. По-перше, - це визначення геометрії на межі присутності потоку вірусної зони. Для цього вірусну зону присутності (ВЗП) необхідно розглянути як окрему абстрактну сутність зі своєю панданною зоною та зоною присутності. По-друге, визначення точної геометрії ВЗП і, як наслідок, її гнукості. По-третє, вплив супутніх процесів на розповсюдження речовини у просторі. Окрім того, існує ще зона гарантованого зараження (ЗГЗ), яка визначається величиною Ξ , тобто маємо суттєву різницю у координатах, яка визначається величиною D і має назву дуальність. Принцип дуальності стосовно вірусного інфіціювання криється у наступному. Для того, щоб зареєструвати вірус, необхідно мати відповідну концентрацію до ресстрації величин Ξ або $[S]$. Але вийти з вірусної зони чутник має можливість лише за певних причин та рівнів концентрації. Наразі ці рівні нижчі за вхідні.

Отже, за виразом (57) ми маємо можливість визначитися з величиною радіуса R_{max} , який окреслює зовнішній контур ВЗП. У виразі (44) зміна властивостей відбувається за товщиною прошарку вірусної інфекції. Але аналітична ситуація відбувається і за зміною відстані від центру координат. Величини l_1 та l_2 маємо сприймати як відцентрову відстань, а вираз (44) зберігає свою справедливість у наших математичних розвідках. Як наслідок, у виразі (39) приймаємо концентрацію за сталу величину, тобто $C_1=C_2$, на яку реагує наша чутлива система вимірювання. У такому випадку маємо наступні залежності

$$\Phi_{max} = \Phi_0 e^{-\alpha_0 C R_{max}} \quad (59)$$

та

$$\Phi_{min} = \Phi_0 e^{-\alpha_0 C R_{min}} \quad (60)$$

Для того, щоб зареєструвати зовнішній контур ВЗП, необхідно, щоб різниця між Φ_{max} та Φ_{min} була не менше за $[S]$, тобто

$$[S] = |\Phi_{max}' - \Phi_{min}'| = e^{-\alpha_0 C} \Phi_0 (e^{R_{max}} - e^{R_{min}}). \quad (61)$$

Ситуація, враховуючи вираз (55), відображена на рис. 2.

ЗГВЗ визначиться як

$$[\Xi] = |\Phi_{max}' - \Phi_{min}'| = \Xi e^{-\alpha_0 C} \Phi_0 (e^{R_{max}} - e^{R_{min}}). \quad (62)$$

Оскільки існує різниця між ВЗП та зоною вірусного зараження (ЗВЗ), то як наслідок виникає явище дуальності, яке позначається літерою D.

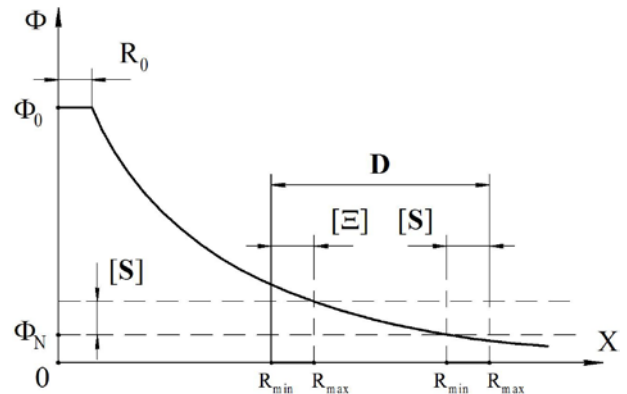


Рис. 2. Визначення розмірів ВЗП за фантомним параметром Φ

Висновки

Отже, ми розглянули розповсюдження вірусів у навколишньому просторі за ідеальних умов. Дуже добре видно, що при цьому ми отримуємо заражений простір у вигляді кулі, а концентрація вірусів змінюється за експоненціальним законом від центру до периферії.

Панданна зона присутності вірусів закінчується за величини $[S]$, а панданна зона зараження величиною $[\Xi]$. Звісно, що така модель процесу не є досконалою, оскільки зона вірусного зараження не стійка і легко деформується, навіть за дії незначних сил.

Таким чином, обґрунтовано аналітичну фантомну модель розповсюдження потоку матеріальних частинок як абстрактних об'єктів. Запропоновано досліджувати аспекти утворення та поведінку вірусних потоків у просторово-часових координатах.

Як наслідок, маємо можливість зробити висновок, що надалі фантомна модель у подальших дослідженнях потребує розгляду впливу координат потоку частинок типу вірусів у період їх розповсюдження в просторі.

Література

- [1] Brauer, Fred, and Carlos Castillo-Chavez, *Mathematical models in population biology and epidemiology*, vol. 40. New York: Springer, 2012.
- [2] В. Н. Леоненко, *Математическая эпидемиология. Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ*. СПб, РФ: Университет ИТМО, 2018.
- [3] M. Roberts, V. Andreasen, A. Lloyd, L. Pellis, 'Nine challenges for deterministic epidemic models', *Epidemics*, Mar 1; 10:49–53, 2015
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк, Т. Р. Клочко, *Теорія біотехнічних об'єктів. Том 2. Динаміка польових взаємодій об'єктів*. Київ, Україна: ТОВ «Інтердрук», 2017.
- [7] В. Е. Кузмичев, *Законы и формулы физики*. Київ, СРСР: Наук. думка, 1989.
- [8] 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.
- [9] V. I. Skytsiouk, 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.
- [10] Л. А. Булавін, Д. А. Гаврюшенко. *Молекулярна фізика: Підручник*. Київ, Україна: ЗНАННЯ, 2006.
- [11] И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. *Справочник по математике*. Москва, СССР: Наука, 1967.

УДК 621.9008:620.179

В. И. Скицюк, Т. Р. Клочко*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина***ФАНТОМНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИРУСНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПАНДЕМИИ. ЧАСТЬ 1**

Введение. Статья посвящена изучению распространения материальных частиц, например вирусов, в космосе, определению их размерных характеристик. Перед современной медициной стоит проблема диагностики инфекционных заболеваний, а также определения места происхождения и характера образования вирусов, их структуры и характера взаимодействия с живыми организмами. Эти проблемы предотвращения пандемии имеют первостепенное значение. Актуальность исследования подтверждается необходимыми требованиями по повышению точности определения фактического размера потоков.

Результаты исследований. Основываясь на описанных задачах, основной целью данного исследования было создание модели распространения вирусов как материальных объектов в космосе, то есть геометрических параметров зон их присутствия. Рассмотрены версии гипотез об их происхождении. Такими гипотезами являются регрессивная, клеточного происхождения и коэволюция. У каждого из них есть свои сторонники и противники, а потому нет оснований заострять внимание на этой теме. А пока, абстрагируя этот объект, мы будем воспринимать его как шар, с поверхности которого исходит поток вирусов. Масса вирусов, покидающая организм матери, создает поток в виде совокупности отдельных частиц. Определена общая зависимость количества вирусов, которые могут распространяться в окружающее пространство. Кроме того, создана модель для определения консервативных полей, обладающих свойством действия силы, совпадающей с направлением векторного поля. В то же время полевые структуры материнского тела могут искажаться при взаимодействии с полями других материнских тел и объектов. Таким образом, определяется размер зоны присутствия вирусов в пространстве вокруг тела матери, т.е. способность определять величину радиуса, очерчивающего внешний контур зоны вирусного присутствия.

Выводы. Таким образом, рассматриваются особенности распространения потока вирусов в окружающем пространстве в идеальных условиях. Совершенно очевидно, что мы получаем зараженное пространство в форме шара, а концентрация вирусов экспоненциально изменяется от центра к периферии. Таким образом, обоснована аналитическая фантомная модель распространения потока материальных частиц как абстрактных объектов. Предлагается исследовать аспекты формирования и поведения вирусных потоков в пространственно-временных координатах.

Ключевые слова: фантом; моделирование; поток частиц; распределение потока.

V. I. Skytsiouk, 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 1**

Introduction. The article deals with the study of the propagation of material particles, like viruses, in space, the definition of their dimensional features. Modern medicine faces the problem of diagnosing infectious diseases, as well as determining the place of origin and nature of the formation of viruses, their structure and the nature of interaction with living organisms. These problems of avoiding a pandemic are paramount. The relevance of the study is confirmed by the necessary requirements to improve the accuracy of determining the actual size of the flows.

Research results. Based on the problems described, the main purpose of this study was to create a model of the spread of viruses as material objects in space, ie the geometric parameters of their zones of presence. Versions of hypotheses

concerning their origin are considered. Such hypotheses are regressive, cellular origin and coevolution. Each of them has its supporters and opponents, and therefore has no reason to focus on this topic. For now, abstracting this object, we will perceive it as a ball from the surface of which comes a stream of viruses. The mass of viruses that leaves the mother's body creates a flow in the form of a collection of individual particles. The general dependence of the number of viruses that can diffuse into the surrounding space has been determined. In addition, a model for determining conservative fields that have the property of force acting that coincides with the direction of the vector field is created. At the same time, the field structures of the mother body can be distorted when interacting with the fields of other mother bodies and objects. Therefore, the size of the zone of presence of viruses in the space around the mother's body is determined, ie the ability to determine the magnitude of the radius that outlines the outer contour of the zone of viral presence.

Conclusions. Thus, the peculiarities of the spread of the flow of viruses in the surrounding space under ideal conditions are considered. It is very clear that we get an infected space in the form of a sphere, and the concentration of viruses varies exponentially from the center to the periphery. Thus, the analytical phantom model of the propagation of the flow of material particles as abstract objects is substantiated. It is proposed to investigate aspects of the formation and behavior of viral flows in spatio-temporal coordinates.

Keywords: phantom; modeling; particle flow; flow distribution.

*Надійшла до редакції
07 червня 2020 року*

*Рецензовано
20 червня 2020 року*