

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет природоохоронний

Кафедра загальної та теоретичної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра

на тему: Новітні технології захисту від поверхневих забруднень
шкідливими комплексними макромолекулярними сполуками

Виконав студент 4 року навчання

групи ТЗ-42і

спеціальності 183 «Технології
захисту навколишнього
середовища»

Коломеєць Богдан Сергійович

Керівник д.ф-м. н., професор

Герасимов Олег Іванович

Рецензент д.тех. н., професор

Софронков Олександр Наумович

Одеса 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет природоохоронний

Кафедра загальної та теоретичної фізики

Рівень вищої освіти бакалавр

Спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища»
(шифр і назва)

Освітня програма Технології захисту навколишнього середовища
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри загальної
та теоретичної фізики,
професор Герасимов О.І.

“05”_травня_2021_року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

студенту Коломейцю Богдану Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Новітні технології захисту від поверхневих забруднень
шкідливими комплексними макромолекулярними сполуками

керівник роботи Герасимов Олег Іванович д.ф-м.н, проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “_18_” грудня 2020 року
№_254 – «С»__

2.Строк подання студентом роботи 14.06.2021

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Загальні відомості про електричні технології пило-очистки
2. Експериментальні дослідження динаміки формування електрофоретичних струмів
3. Модель гібридної левітаційно-електрофоретичної динаміки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	Немає		

7. Дата видачі завдання ____ 05.05.2021 _р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Огляд базових літературних джерел за темою дипломного проекту	04.05.- 06.05.21	95	5 відмінно
2	Узагальнення основних теоретичних положень проекту	07.05.- 10.05.21	95	5 відмінно
3	Рубіжна атестація	11-15.05.21р	95	5 відмінно
4	Узагальнення отриманих результатів. Оформлення електронної версії роботи. Перевірка на плагіат. Складання протоколу та авторського договору	16.05- 31.05.21	95	5 відмінно
		01.06.21		
5	Підготовка паперової версії і презентаційного матеріалу до процедури предзахисту. Внесення коректив. Рецензування роботи. Підготовка до публічного захисту.	02.06- 19.06.21	95	5 відмінно
		18.06.2021		
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		95	5 відмінно

Студент _____ **Коломєць Б.С.**

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ **Герасимов О.І.**

(підпис)

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Коломієць Б.С. Новітні технології захисту від поверхневих забруднень шкідливими комплексними макромолекулярними сполуками

Актуальність теми. Актуальність проблеми забруднень об'єктів макро-молекулярними сполуками є зростаючою проблемою сучасності (особливо з огляду на жахливі наслідки пандемії). Фактично, макромолекулярні комплекси у більшості розташовані на поверхневих шарах поверхні вкритої дрібнодисперсним пилом. Тому розробка технології видалення макромолекулярних компонентів є фактично проблемою тонкого (так його будемо називати) пило виведення. Ця проблема не може бути ефективно розв'язана лише традиційними механічними способами пило виведення, оскільки забруднені об'єкти мають доволі складну, навіть не ейлерівську морфологію поверхні. Тому актуальним є розробка ефективних технологій, які базуються на використанні властивостей спеціальних конфігурацій зовнішнього неоднорідного електричного поля і видаляємих компонентів.

Метою кваліфікаційної бакалаврської роботи є розбудова аналітичної моделі левітаційно-електрофоретичної технології дезактивації поверхонь, забруднених дрібнодисперсним пилом з адсорбованими на ньому макромолекулярними сполуками за допомогою спеціально сконфігурованого неоднорідного електричного поля та отримання її точних розв'язків, які б свідчили про теоретичну обґрунтованість такого підходу.

Задачі дослідження.

- Проаналізувати сучасні технології тонкого пило очищення як механічними так і за допомогою зовнішніх полів;
- Проаналізувати умови створення левітаційного та електрофоретичного

- руху у зовнішньому електричному полі ;
- Знайти точні розвязки моделі, які б свідчили на користь теоретичної обґрунтованості технології дезактивації із використанням неоднорідного електричного поля із маніпулюємими властивостями;
 - Визначити умови найбільш ефективного використання левітаційно-електрофоретичної технології в задачах пило чистки та дезактивації.

Науковий керівник: завідувач кафедри загальної та теоретичної фізики д.ф-м.н, проф. Герасимов О.І.

Робота містить:

Сторінок - 32

Рисунків - 4

Літературних посилань- 20

Ключові слова: макромолекулярні забруднення, пилові забруднення, левітація, електрофорез

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПИЛО- ОЧИСТКИ.....	11
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОФОРЕТИЧНИХ СТРУМІВ.....	13
3 МОДЕЛЬ ГІБРИДНОЇ ЛЕВІТАЦІЙНО-ЕЛЕКТРОФОРЕТИЧНОЇ ДИНАМІКИ.....	18
4 ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВІРУСІВ, ЇХ ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ. МІКРОЕЛЕМЕНТНА ОБ'ЄМНА БЛОКАДА ТА ЕЛЕКТРОФОРЕТИЧНЕ ВИВЕДЕННЯ З ПОВЕРХОНЬ.....	23
ВИСНОВКИ.....	30
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	31

ВСТУП

Очистка поверхонь від забруднень макро-молекулярними компонентами є актуальним завданням технологій захисту елементів довкілля. Динаміка макромолекулярних забруднень формується у тому числі із залученням в якості носіїв пилових мікро-частинок, які можуть бути як нейтральними, так і зарядженими. Ми будемо притримуватися концепції, що дезактивація, яка мається на увазі в задачах захисту від маромолекулярних сполук (у тому числі вірусів, може бути заведена до пило виведення з поверхні. Безумовно, модель, яку розглянемо з цією метою, можна застосовувати і до параметризації процесів безпосереднього виведення макромолекулярних компонент із зараженої поверхні.

Проблема виведення пилу (пиловловлення та пилоочищення) з розвитком сучасних технологій та їх впливу на навколишнє середовище набула широкого масштабу та на разі є актуальною і потребує розробки та впровадження принципово нових технологічних рішень. На цьому шляху розробка технологічних засобів видалення дрібнодисперсних мікромеханічних часток пилу з простору приміщень промислового/побутового/санітарного (та навіть космічного) є актуальною задачею відповідної галузі технологій захисту навколишнього середовища. Саме цей вид пилу є досить небезпечним для життєдіяльності людини, через дуже високу проникливість до організму людини, а також до різноманітних приладів, які супроводжують діяльність людини. Дослідження в цьому напрямку, останнім часом спрямовані також на системи, що перебувають у спеціальних умовах (скажімо, малої гравітації), які дозволяють їх ефективно маніпулювання за допомогою сконфігурованих зовнішніх електричних полів різної напруги [1-6].

Розглянемо можливості теоретичного моделювання процесу поєднання явищ левітації та електрофорезу з метою поетапного

маніпулювання динамікою дрібнодисперсного пилу. Актуальність розробки та використання подібних технологій, наприклад для програми космічних досліджень детально обговорюється в [11-12]. Порівняльний аналіз різних існуючих технологічних методів видалення пилу наведений в [1-6] надає можливості визначити переваги та недоліки їх використання для ефективного очищення від пилу.

Так, зокрема, існуючі поширені механічні методи пилоочистки мають суттєві обмеження, зокрема, тому, що механічна фільтрація та виведення пилу не дають можливості щодо повної евакуації дрібного пилу, особливо із поверхонь із складної морфологією. Тому виникає завдання задіяти електричне поле, яке має велику проникаючу здібність і, зокрема, може, завдяки маніпулюванню, сформувати рух мікро-механічних частинок (у неоднорідному електричному полі), згрупувати частинки пилу у кластери лівітуючого шару та створити подальші умови задля, наприклад, утворення електрофоретичного руху частинок з цього шару для наступної евакуації (видалення) пилових конгломерацій.

Теоретична модель, яка може бути покладена в основу вищеописаної технології і має дозволити змодельовати кінетичні стадії всього процесу маніпулювання динамікою мікро-механічних систем.

На цьому шляху пропонується проаналізувати комбіновану лівітаційно-електрофоретичну модель, яка описує маніпуляції механічними пиловими конгломераціями у цілях створення концептуальної основи технологій захисту об'єктів навколишнього середовища не тільки від самих пилових забруднень, але і від адсорбованих на них сполук, у тому числі макромолекулярного і вірусного походження. До основних технологій тонкої пило-очистки від дрібнодисперсного пилу, можуть бути віднесені ті, що діють за рахунок прикладеного зовнішнього маніпулюємого електричного поля (під дією електричних сил), а саме – електричні пиловловлювачі та електрофільтри. Використання таких технологій, як правило, вимагає значних електричних затрат. Тому визначення шляхів зниження робочих

енергетичних напруг, які супроводжують запропоновану левітаційно-електрофоретичну технологію є суттєвим елементом (такі умови вірогідно можуть бути створені завдяки природним умовам космічного середовища, де тонка пило-очистка є суттєвою проблемою, що вимагає вирішення). Ми запропонуємо теоретичну концепцію і модель технології, яка має працювати в масштабі, в якому створюється і зовнішнє електричне поле, яке припускає детерміновану маніпуляцію.

Напруги, за умов яких створюється рух мікро-механчних частинок пилу в зовнішніх гравітаційному та електричному полях складають декілька кіловольт.

Таким чином, удосконалення відповідних технологій перше за все вимагає пошуку шляхів (або умов) зменшення напруг потрібних для генерації електрофоретичного руху. Можливими напрямками пошуку є маніпулювання параметрами системи (зокрема топологією частинок, а також геометрією електродів), зовнішнім тиском, вологістю, зниження гравітації, та деякі інші.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПИЛООЧИСТКИ

Необхідність видалення пилу обумовлена шкідливим впливом на здоров'я людини чи технологічні процеси.

Структура та склад пилу залежить від особливостей процесу його виникнення і властивостей речовин, з яких він складається. Однією з важливих характеристик пилу, яка впливає на можливості маніпулювання їм, є його дисперсійний склад. За інтервалами дисперсності пил поділяється на крупнодисперсний, в інтервалі до 10 мкм; середньодисперсний в інтервалі від 0.25 до 10 мкм, та дрібнодисперсний в інтервалі більше 0.25 мкм. В залежності від типу дисперсності обирається найбільш оптимальний метод видалення пилу. Для видалення дрібнодисперсного пилу неефективно використовувати механічні засоби очищення. Тому видалення дрібнодисперсного пилу потребує спеціальних, як-то кажуть, тонких методів очищення. Це виникає тому, що на частинки такого пилу діє цілий комплекс сил. Дрібнодисперсність обумовлює особливі форми поведінки пилу в умовах діючих сил, затримуючих пил на складах забруднених поверхнях, які можуть мати навіть неевклідовську просторову морфологію. Дрібнодисперсний пил проникає та затримується у важкодоступних місцях. Процес підйому та зависання у стаціонарному стані частинок пилу, в напрямку, протилежному підсумковому напрямку дії комплексу діючих сил, називається левітуючим рухом.

Використання маніпулюємого електромагнітного поля у технології очищення приміщень від дрібнодисперсного пилу має за мету поєднання ефектів левітації і електрофорезу. Для цього відповідна модель має містити параметри, які визначають критерії левітаційного та електрофоретичного режимів руху пилових частнок. Левітаційний, пов'язаний з підйомом пилу з поверхні та формуванням квазі-стаціонарної пилової конгломерації, яка парує над поверхнею будь якої складної морфології.

Електрофоретичний, передбачає стадію поляризації у випадку діелектричної природи частинок пилу (діелектрофорез). У випадку заряджених частинок стимульований зовнішнім електричним полем рух частинок (електрофорез).

Неоднорідне електричне поле, за рахунок ієрархічного маніпулювання здібне стимулювати, як левітаційний так і електрофоретичний ефекти.

Гібридна технологія, яка поєднує умови створення левітуючої ковдри та спрямованого електрофоретичного руху має використовувати єдине джерело поля із плавною маніпуляцією величини напруги, достатньої для послідовного стимулювання левітаційного та електрофоретичного процесів. На першому етапі до очищуваної поверхні прикладається поле. Завдяки впливу поля дрібнодисперсний пил формується у левітуючий шар. Потім на другому етапі подається додатковий електричний струм, завдяки якому пилова конгломерація переходить до стану динамічного руху. При цьому джерело поля залишається єдиним. Приймаючи, що макромолекулярні сполуки адсорбовані зв'язані іншим чином із частинками пилу ми маємо сценарій очікуваної дезактивації.

2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОФОРЕТИЧНИХ СТРУМІВ

Необхідність побудови моделі, яка б враховувала можливість використання ефекту левітації, як первісної стадії процесу тонкого пилоочищення (дезактивації від макромолекулярних сполук), яка є попередньою перед електрофоретичною, ґрунтується на експериментальних спостереженнях з виведення пилових конгломератів з горизонтальної поверхні у вигляді вертикального струму мікрочастинок (кластерів), збудженого зовнішнім електричним полем. В експерименті [1-6] спостерігається специфічна динаміка струменю (Рис.2.2), яка характеризується суттєвою неоднорідністю струму (струм кластерів). Це явище демонструє складний неоднорідний характер потоку частинок, який створюється зовнішнім (неоднорідним) електричним полем і ускладнює, а також знижує якість очистки (дезактивації). Водночас, воно свідчить на користь можливості моделювати цей процес користуючись уявленням про динамічні ефективні параметри кластерів з декількох частинок (зокрема ефективні радіуси, маси частинок).



Рис.2.1 - Фрагмент фільму із спостережень.

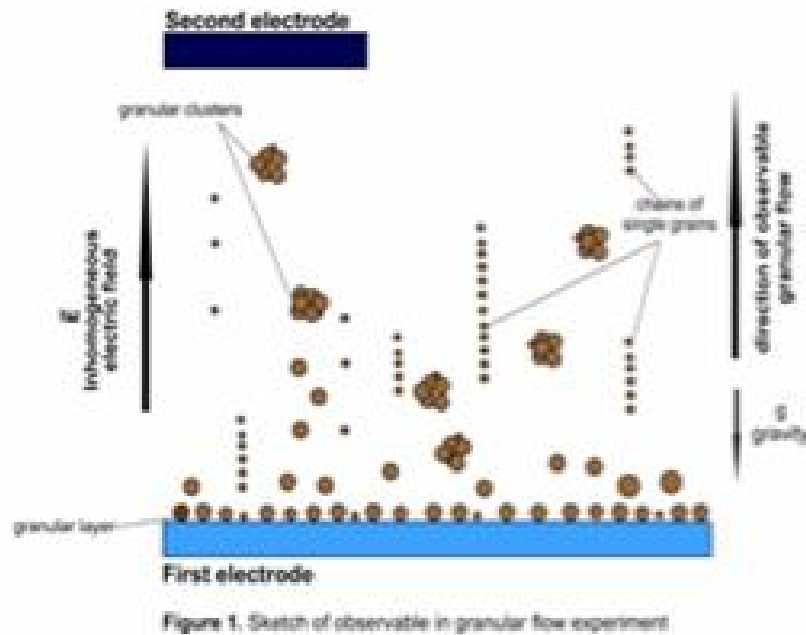


Рис. 2.2. - Скетч формування електрофоретичного ефекту струму в експерименті із спостереження руху гранульованих частинок

Перевагами описаного способу тонкого пилоочищення є створення можливостей видалення дрібно-дісперсних частинок з поверхонь будь-якої морфологічної складності, включаючи важкодоступні місця. Недоліком є необхідність використання силового поля великої напруженості (приблизно, у 20 кіловольт).

Технологія видалення пилу за допомогою електричного поля в різних умовах оточення вивчалась в роботах [1-6]. Показано, що за цією методикою можна піднімати та транспортувати заряджені та незаряджені частинки за особливо ефективно в умовах зменшеної гравітації, за допомогою електростатичних та діелектрофоретичних сил [7-10]. Типова конструкція пилового захисту складається з ряду паралельних електродів, підключених до джерела змінного струму, які генерують хвилю, що рухається, так би мовити, в режимі безконтактного транспортера (Рис. 2.3).

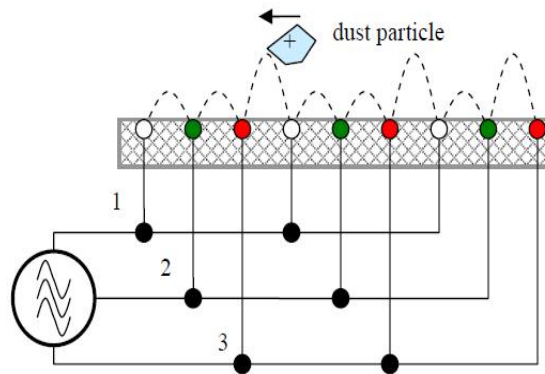


Fig. 1: Three-phase electric curtain.

Рис.2.3. Схема трьохфазного електричного дезактивуєчого модуля .

Частинки відштовхуються електродами, які використовуються для створення поля, і рухаються вздовж або проти напрямку руху хвилі, залежно від їх полярності. Електроди захисного екрану можуть збуджуватися однофазною або багатофазною змінною напруги. В однофазному електричному захисті паралельні циліндричні електроди, підключені до джерела змінного струму, генерують електричне поле, напрямком якого змінюється разом із зміною полярності електродів. Таким чином створюється стояча хвиля, яка у свою чергу, генерує силу що буде діяти на будь-яку заряджену частинку в області поля. Оскільки ґратка електродів зазвичай покрита тонким ізолюючим шаром для збільшення напруги пробую, незаряджені частинки, що розподілені на поверхні до включення поля, можуть. Багатофазна електрична система захисту створює біжучу хвилю, оскільки потенціал на кожному електроді змінюється внаслідок фазового зсуву. Заряджена частинка в цій області рухатиметься з цією хвилею або проти неї, залежно від її полярності. Розглянемо тепер можливість збудження стадії левітації. У відповідності до визначення, сила, яка діє на частинки, які левітують над поверхнею, у

квазістаціонарному режимі може бути записана у вигляді комбінації електродинамічної сили, в'язкої сили та сили тяжіння (рівняння руху Ланжевена):

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} = -mgZ - 6\pi\zeta a \frac{dZ}{dt} + F_E(Z) + f(t). \quad (2.1)$$

де m – середня (або ефективна) маса частинок, z – положення частинки (вздовж вертикально піднятої вісі), η – в'язкість середовища, в якій рухаються частинки, q – заряд частинки, g – прискорення у гравітаційному полі, $F(z)$ силова характеристика зовнішнього поля, яке діє на частинки, f сила, яка діє на виділену частинку з боку оточуючих внаслідок міжчастинкових зіткнень. Через складний характер взаємодії частинок із полем, рух частинок є суттєво нелінійним. Відповідне рівняння руху, яке враховує в загальному вигляді всі види взаємодії, в загальному випадку не може бути розв'язане аналітично.

В [9] було запропоновано розв'язок рівняння руху у лінійному наближенні, і отримані розв'язки у вигляді малих коливань частинок. Крім того, за допомогою чисельного розв'язку були змодельовані траєкторії руху частинок, які досить добре відповідали даним фактичних вимірів. Були проведені чисельні випробування на прозорих пилозахисних шарах під високим вакуумом, щоб зрозуміти їх можливості та обмеження (Рис. 4). Ефективність очищення визначали якісно, використовуючи методи візуальної оцінки для кожного тесту. Було з'ясовано, що видалення пилу перестає відбуватися через короткий час після активації. Як тільки макроскопічне переміщення пилу вже не спостерігалось, вимірювальний комплекс вимикався і оцінювалася ефективність захисту. Хоча цей метод визначення ефективності є вельми приблизним (і навіть- неточним), у межах $\pm 5\%$ він дає можливість оцінити ефективність описаної технології. Його

переваги полягають в тому, що він задовільно працює для порівняння даних низки іспитів і значно скорочує час тестування (на відміну від тих, в яких треба застосовувати сотні вимірів). Зокрема, він є ефективним для цілей очистки сонячних панелей, особливо в умовах космічних досліджень, в яких оперують частинками розміром порядку 1 мкм, які заважають дії оптичних систем, таким як телескопи та знімачі.

Треба зауважити, що для оптимізації відповідної технології такі параметри, як розмір пилу, вміст вологи, велике або низьке завантаження пилу, рівні напруги, частоти – потрібно попередньо з'ясувати. Наприклад, відповідь на просте запитання, як впливає вологість середовища на процеси, що відбуваються на поверхні частинок, скажімо на наявність та величину капілярних сил, вимагає попереднього і бажано детального з'ясування.

3 МОДЕЛЬ ГІБРИДНОЇ ЛЕВІТАЦІЙНО-ЕЛЕКТРОФОРЕТИЧНОЇ ДИНАМІКИ

Таким чином, відповідна технологія, яку ми пропонуємо, полягає у створенні фізичних умов протікання левітаційно-електрофоретичних процесів з метою тонкої пило-очистки із використанням зовнішнього поля, із забезпеченням умов формування левітаційних розподілів і індукованих електрофоретичних потоків. Однією з вимог до левітаційно-електрофоретичної моделі є можливість суперпозиції поля тяжіння та електричного поля. Суттєву роль в розглянутій технології також відіграє етап створення левітуючого шару, тобто утворення левітуючих конгломерацій видалюваного дрібнодисперсного пилу з ціллю створення умов його подальшого комплексного видалення з поверхонь із складною морфологією. Відомо, що поляризовані діелектричні частинки можуть формувати діелектро-форетичну динаміку [7-10]. Оскільки нейтральні частинки містять майже рівну кількість позитивних і негативних зарядів електричне поле індукує в них дипольний момент. Взаємодія визначеного моменту з електричним полем призводить до появи відповідної сили. Аналогічно, частинки з власними електричними дипольними моментами (наприклад, вода), також будуть відчувати дію сили у зовнішньому полі. Умови електрофорезу полягають в тому, що частинки мають діелектричну сталу, відмінну від її значення у навколишньому середовищі. Усереднена за часом сила, яка діє на наведений, чи перманентний електричний диполь в електричному полі викликає, відповідно, керуємий рух частинок (кластерів).

Дія цієї сили, яка визначається обумовлює можливість ефективно маніпулювати параметрами відповідного руху мікрочастинок, змінюючи параметри впливу (електромагнітні поля). Описані процеси відіграють важливу роль в конструкціях фільтрів, які виконують розділення системи на складові компоненти. Саме для потреб цієї інженерії широко використовується метод електрофорезу (наприклад в мікробіології, для

маніпуляціями бактеріями та клітинами). При застосуванні механічних методів існують суттєві обмеження якості, пов'язані із полідисперсним характером системи. Технологія фільтрування, яка базується на використанні електричних ступенів свободи і маніпулює зовні поле не мають цих обмежень, і можуть бути ефективно застосовані, шляхом зміни контролюємих параметрів для розділу на складові компоненти складних полідисперсних систем.

Пропонуєма технологія тонкої пилоочистки базується на використанні маніпулюємого зовнішнього неоднорідного електричного поля, яке впливає на частинки пилу і викликає по перше-спливання пилу над поверхнею, на якій він початково розподілений, а потім формування струму, який формується під впливом сил електрофоретичного походження. Ієрархічне розділення цих стадій динаміки може бути здійснене, так як критерії їхнього виникнення на практиці не співпадають. Переваги такої технології полягають в можливості створення умов формування левітаційного шару над поверхнею із будь-якою топологічною складністю. Метод також не має обмежень з точки зору полідисперсного складу коври із мікро-механічних частинок, оскільки суто явище левітації виникає внаслідок перш за все балансу сил, які формують динаміку системи. Суттєво, що обидві стадії динаміки пило виведення регулюються одним і тим же фактором, а саме зовнішнім електричним полем, яке діє як на заряджені частинки (електрофорез), так і на діелектричні, які поляризуються і отримують наведений дипольний момент. Формально, теоретичний базис пропонуємої технології базується на уявленні про конгломерацію дискретних диполів (перманентних, чи наведених), на які впливає зовнішнє неоднорідне електричне поле. На систему при цьому діє сила, яку можна визначити за формулою [7-10]:

$$F = QE + (p \nabla)E, \quad (3.1)$$

Якщо зовнішнє поле високочастотне (ω перевищує 1 кГц), електрофоретичні ефекти обумовлюються головним чином завдяки його градієнту. Окрім цього, на величину сили і параметри руху впливають розмір, вага, провідність та морфологія частинок. Ця сила викликає рух частинки в напрямку градієнта або проти нього в залежності від того, чи є частинка більш поляризованою, ніж середовище, в якій вона знаходиться.

Типовим способом створення неоднорідного поля, яке стимулює явище діелектрофорезу є використання системи електродів із різною геометрією. Сучасна мікроелектронна схемотехніка дозволяє створити будь-яку геометрію контактів в потрібному масштабі. Існують різноманітні конструкції системи електродів для створення неоднорідного електричного поля, серед яких можна вказати, наприклад, системну комбінацію плоских і гострих електродів. Проміж ними створюється поле градієнт якого, може бути запрограмовано змінено у відповідності до потреб технології. Картина виглядає так, як схематично зображено на Рис. 3.1.



Рис. 3.1 - Розміщення електродів в модулі створення електрофоретичного руху

Зображена на Рис. 3.1 конструкція відповідає умові, коли діелектрофоретична сила, яка виникає внаслідок взаємодії наведеного

дипольного моменту частинки з зовнішнім полем виявляється достатньою для створення умов спрямованого руху поляризованих частинок.

З експериментів, висвітлених на Рис. 3.1 випливає, що стимульований полем рух мікромеханічних частинок складається не з окремих частинок, а скоріше з кластерів, які рухаються практично у балістичному режимі. Відповідно, рівняння руху (3.1) заряджених частинок пилу (електрофорез), з урахуванням спрощень, має наступний вигляд:

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} = -mgZ - 6\pi\zeta a \frac{dZ}{dt} + F_E(Z) \quad (3.1)$$

Сила з якою поле впливає на діелектричні частинки пропорційна градієнту квадрата напруженості. У випадку заряджених частинок вона пропорційна напруженості. Розглянемо наступні конфігурації (лінійну і нелінійну) зовнішнього неоднорідного електричного поля:

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} + mgZ + 6\pi\zeta a \frac{dZ}{dt} = \alpha \Gamma Z \quad (3.2)$$

Зупинимось на моделі зовнішнього лінійній моделі електричного поля і розглянемо рівняння руху у наступному вигляді

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} + mgZ + 6\pi\zeta a \frac{dZ}{dt} = \alpha \Gamma Z \quad (3.3)$$

Аналітичний розв'язок рівняння (3.3) має наступний вигляд:

$$Z(t) = \begin{cases} e^{\frac{1}{2}\pi\zeta\alpha t} \{c_1 \cos xt + c_2 \sin xt\}, & x^2 > 0 \\ e^{\frac{1}{3}\pi\zeta t} \{c_1 \operatorname{ch} xt + c_2 \operatorname{sh}(xt)\}, & x^2 < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$x^2 = g - \frac{\alpha\Gamma}{m} - 9\pi^2\zeta^2 a^2$$

Очевидно, що зміна режимів в динаміці руху регулюється мульти - параметром вибір якого в інтервалі значень

$$g \geq \frac{\alpha \Gamma}{m} + \frac{82}{9} \pi^2 \zeta^2 a^2 \quad (3.5)$$

веде до стаціонарного розв'язку рівняння руху. Останнє свідчить про можливість левітаційного етапу електрофоретичної динаміки.

Вибір нелінійної моделі для електричного поля, як можна показати, веде до рівняння руху у формі Абеля, яке не інтегрується в квадратурах і тут ми цей випадок детально розглядати не будемо. Але зауважимо, що як будь-який нелінійний сценарій, такі конфігурації надають ще більших можливостей для маніпулювання типом динаміки за рахунок зміни контролюємих параметрів.

Підсумовуючи, можна очікувати що розв'язки керуючого рівняння моделі для довільних конфігурацій прикладеного електричного поля із змінними параметрами і навіть змінного (скажімо за гармонічним законом) у часі дає можливість описувати різні етапи формування левітаційно-електрофоретичної динаміки і надається співвідношенням типу

$$z(t) = C_2 \frac{g}{|\chi|} + C_1 e^{-|\chi|t} - C_2 F(z) \frac{\cos(\arctg \frac{w}{|\chi|} + wt)}{|\chi|^2 + w^2} \quad (3.6)$$

Вищенаведене співвідношення (8) за рахунок формування належного вигляду функції $F(z)$ аналітично описує можливість очікуваної стадії левітації із поетапним переходом ієрархічного типу до контролюємого електрофоретичного руху із наступним збором та утилізацією.

4 ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВІРУСІВ, ЇХ ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ. МІКРОЕЛЕМЕНТНА ОБ'ЄМНА БЛОКАДА ТА ЕЛЕКТРОФОРЕТИЧНЕ ВИВЕДЕННЯ З ПОВЕРХОНЬ

З урахуванням виявлених електричних властивостей коронавірусу ([13-16]), електричну модель коронавірусу SARS-CoV-2 можна уявити собі у вигляді симетричної багаточарової сфери з трьома електрично зарядженими оболонками і ядром, яке має позитивний заряд. Оболонки мають різні знаки зарядженості і величини електричних зарядів. Перша (зовнішня) оболонка заряджена негативно. Друга (внутрішня) оболонка заряджена позитивно. Вона відображає електричні заряди білків на RBD. Третя (внутрішня) оболонка заряджена позитивно і знаходиться на відстані 10 нм від зовнішньої оболонки.

Перша (зовнішня) оболонка має сумарний негативний електричний заряд, рівний $-21Ne$. де: e - заряд електрона, дорівнює $1,60217662 \times 10^{-19}$ Кл; N - кількість пепломерів. Третя (внутрішня) оболонка має сумарний позитивний електричний заряд, імовірно рівний $+9Ne$. Електричні заряди розташовуються на поверхні вірусу дискретно у відповідності до геометричного місця розташування пепломерів на поверхні, Електричні поля зарядів безперервні за рахунок перекриття сусідніх електростатичних полів зарядів. Це буде представлено на графічній моделі, де кожна оболонка відображає безперервний характер електричного поля, утвореного або електронегативними, або електропозитивними ділянками поверхні вірусу.

Модель відображає наявність електростатичних полів груп електричних зарядів на поверхні вірусу. В результаті навколо ядра (навколо + РНК) утворюється багаточарова польова оболонка. В такому польовому електростатичному вбранні вірус взаємодіє з клітиною. На рис. 4 представлена електрична модель коронавірусу SARS-CoV-2. SARS-CoV-2 має додаткові електропозитивні оболонки, що відображають електричні

заряди білків групи розщеплення і наявність електропозитивних ділянок поверхні на самому домені RBD . Облік їх впливу дозволяє з'ясувати, які електричні струми будуть протікати через мембрану при злитті вірусу з клітиною, отримати енергетичні характеристики вірусу, його енергетичний потенціал і визначити, які зміни зазнає цей потенціал при злиття вірусу з клітиною. Електрична модель коронавірусу дозволить глибше зрозуміти роль і місце кулонівських сил в процесах адсорбції і злиття вірусів з клітиною і виявити потенційно вразливі місця коронавірусу. Особливий інтерес представляють ті вразливі місця вірусу, на які можна впливати електрично зарядженими речовинами або електричним полем. Серед електрично заряджених речовин найбільший інтерес в цьому плані представляють мікроелементи в низького ступеня окислення .При побудові електричної моделі коронавірусу SARS -CoV-2 враховані наступні його особливості, що впливають на кулонівський механізм взаємодії вірусу з клітиною.

1. Коронавірус SARS-CoV-2 являє собою електрично заряджену біологічну наночастинку розміром приблизно 120 нм. Вірус має довжину шипів близько 20 нм .
2. Поверхня вірусу, розгалужена за рахунок знаходяться на ній шипів, на шипах розташовані електрично заряджені ділянки ([13],[16]).
3. Усередині оболонки вірусу знаходиться позитивно заряджена РНК.
4. Електричні заряди на поверхні розподілені певним, суворо фіксованим чином ([13],[16])).

Додатково, крім знака електричних зарядів, необхідно знати величини електричних зарядів білків на поверхні вірусу і заряд ядра. Необхідно з'ясувати, як змінюється картина розподілу електричних зарядів вірусу при адсорбції вірусу і взаємодії з ACE2, CD147 і NRP1 (нейропілін-1). Дуже важливо з'ясувати, які зміни зазнає картина розподілу електричних зарядів на поверхні вірусу при злитті його з кліткою. Для більш детальної електричної моделі вірусу необхідно знати величину електричної ємності вірусної

частинки, діелектричну проникність і провідність. Їх облік вимагає додаткових досліджень. Відомо, що діелектричні властивості білків капсида і глікопротеїнів оболонки значно впливають на діелектричні постійні вірусів і, в кінцевому рахунку, на їх електричну ємність, що дозволяє застосувати метод скануючої зондової мікроскопії (SPM - scanning) для визначення електричної ємності вірусу. Цей метод вже застосовують для виявлення та ідентифікації вірусів, використовуючи їх різні спектри електричної ємності в якості унікальних ідентифікаційних ознак ([17]). Представлена на Рис.4.1 електрична модель коронавірусу SARS-CoV-2 відображає всього лише одне з істотних властивостей коронавірусу - його електричні властивості і, природно, є спрощеним відображенням реального вірусу.

Подальше уточнення моделі має враховувати електростатичне оточення взаємодіючих об'єктів, дисперсійні взаємодії і процеси гідратації. Це вимагає додаткового дослідження.

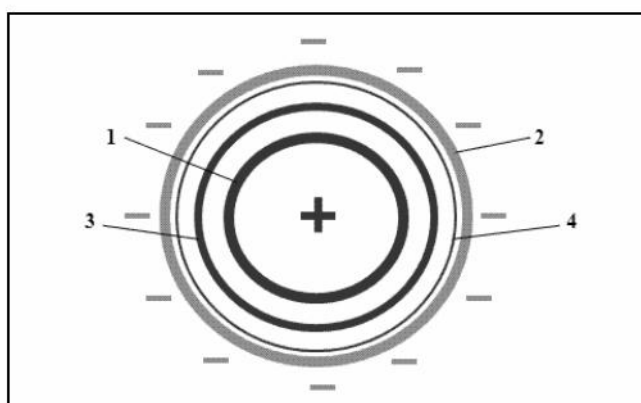


Рис. 4.1 - Електрична модель коронавірусу SARS-CoV-2

1 - електрично заряджена + РНК вірусу; 2 - електронна зовнішня оболонка, яка відображає заряди пепломерів; 3 – електропозитивно заряджена внутрішня оболонка, яка відображає позитивно заряджені білки сайтів розщеплення; 4 - додаткова електропозитивна внутрішня оболонка, яка відображає позитивно заряджені ділянки на RBD SARS-CoV-2.

Електричні властивості вірусів - це не приватні прояви їх морфологічної структури, а фундаментальний принцип їх організації.

Електрична модель коронавірусу дозволяє виявляти їх нові вразливі місця. Запропоновано розглядати в якості мішеней для противірусних засобів електрично заряджені білки на поверхні вірусу. Це дає можливість вибрати правильну стратегію боротьби з вірусом і підказує, які електрично заряджені речовини можна застосовувати для інактивації вірусів і для зниження їх адсорбційної активності. Тут важко переоцінити роль мікроелементів, оскільки багато місць на поверхні коронавірусу є потенційними мішенями, легко доступних для мікроелементів і недоступних для великих молекул ([16]). Мікроелементи є найбільш ефективними електрично зарядженими речовинами, що впливають на активність вірусу, оскільки дуже вдало поєднують електричні особливості, притаманні вірусам, і електричні можливості мікроелементів, в тому числі мікроелементів в низького ступеня окислення. У порівнянні з великими молекулами, наприклад з електрично зарядженими олигопептидами, вони мають менші розміри, більш рухливі, здатні проникати у важкодоступні місця на поверхні вірусу і не є для організму чужорідними речовинами. Унікальність мікроелементів в низького ступеня окислення полягає в тому, що вони одночасно можуть бути і антиоксидантами, і противірусними речовинами, і каталізаторами біохімічних процесів. Таке поєднання трьох функцій робить їх незамінними компонентами субстанцій для виробництва лікарських препаратів медичного і ветеринарного призначення.

Механізм противірусної дії мікроелементів заснований на протидії електростатичній кулонівській взаємодії вірусу з клітиною шляхом компенсації, нейтралізації і зміни електричного заряду на поверхні вірусу. Дія мікроелементів не направлена на знищення вірусу, але вони своїми електричними зарядами не дають можливості вірусам реалізовувати їх найзагрозливіші природні функції адсорбції і злиття з кліткою. Антисептики на основі мікроелементів можуть використовуватися, як профілактичні засоби захисту організму від інфекції COVID-19.

Для ефективного контролю і лікування вірусних інфекцій є вкрай бажаним швидкий метод ідентифікації вірусу (протягом хвилин). Ідентифікація вірусів досі проводиться на основі морфології вірусних частинок, вірусного білка і / або виявлення нуклеїнових кислот . Електрична модель вірусу дозволяє розробляти електричні експрес -методи для виявлення та ідентифікації вірусів. Різним типам вірусу можна поставити у відповідність свої «сигнатури» у вигляді сукупності їх електричних параметрів, наприклад, на основі електричної ємності і діелектричної проникності. Виходячи з геометричних особливостей будови коронавірусу SARS-CoV-2, можна припустити, що величина його електричної ємності може становити величину порядку $(2-8) \times 10^{-10}$ мкФ. Для визначення величини діелектричної проникності і провідності (електричного опору) необхідно проводити спеціальні дослідження. Ємність залежить від геометричних особливостей будови вірусу. Отже, будь-яка відмінність вірусної електричної ємності в першу чергу пов'язана з відмінностями будови вірусної частинки. Діелектрична проникність безпосередньо пов'язана зі складом білків вірусних частинок. Кожен тип вірусу унікальний за своєю будовою і за своїм власним складом білків і нуклеїнових кислот, що відбивається на величині його ємності і діелектричної проникності. Додатковими електричними параметрами для «сигнатури» вірусу є кількість електрично заряджених оболонок і величини електричних зарядів його оболонок. Таким чином, електричні характеристики можна використовувати для виявлення та ідентифікації типу вірусу ([18]).

Вимірювання електричних параметрів вірусу дозволяє застосовувати сучасні електронні методи для виявлення і кількісної оцінки вірусів. Електричні вимірювання дозволяють швидко (протягом декількох хвилин) проводити кількісну оцінку і визначати тип тестованого вірусу . Для виявлення та ідентифікації вірусів запропоновано використовувати сучасні біосенсиори. Коли електрично заряджена наночастинок-вірус зв'язується з поверхнею біосенсора, вона своїм електричним полем змінює заряд каналу

біосенсора, що дозволяє здійснити електричне виявлення вірусів ([19]). Розроблено метод, який дозволяє здійснити пряме електричне виявлення одиночних вірусних частинок в режимі реального часу з високою селективністю. Механізм виявлення вірусу заснований на польовому ефекті - на виявленні та реєстрації електричних зарядів білків вірусу ([20]).

Електричні властивості вірусів - це не приватні прояви їх морфологічної структури, а фундаментальний принцип їх організації. Електрична модель коронавірусу дозволяє виявляти нові вразливі місця коронавірусу. В якості мішеней для противірусних засобів можуть використовуватися електрично заряджені білки на поверхні вірусу. Це дає можливість вибрати правильну стратегію боротьби з вірусом і підказує, які електрично заряджені речовини можна застосовувати для інактивації вірусів і для зниження їх адсорбційної активності. Важливу роль тут можуть відігравати мікроелементи, оскільки багато місць на поверхні коронавірусу, є потенційними мішенями, легко доступні для мікроелементів і недоступні для великих молекул ([16]). Мікроелементи є ефективними електрично зарядженими речовинами, що впливають на активність вірусу, оскільки вдало поєднуються електричні особливості, властиві вірусам, і електричні можливості мікроелементів, в тому числі мікроелементів в низького ступеня окислення. За порівнянні з великими молекулами, наприклад з електрично зарядженими олигопептидами, вони мають менші розміри, більш рухливі, здатні проникати у важкодоступні місця на поверхні вірусу і не є для організму чужорідними речовинами. Унікальність мікроелементів в низького ступеня окислення полягає в тому, що вони одночасно можуть бути і антиоксидантами, і противірусними речовинами, і каталізаторами біохімічних процесів. Таке поєднання трьох функцій робить їх незамінними компонентами субстанцій для виробництва лікарських препаратів медичного і ветеринарного призначення. Механізм противірусної дії мікроелементів заснований на протидії електростатичного кулонівської взаємодії

вірусу з клітиною шляхом компенсації, нейтралізації і зміни електричного заряду на поверхні вірусу. Дія мікроелементів не направлена на знищення вірусу, але вони своїми електричними зарядами не дають можливості вірусів реалізувати їх найважливіші природні функції адсорбції і злиття з кліткою. Антисептики на основі мікроелементів можуть використовуватися як профілактичні засоби захисту організму від інфекції COVID-19.

Виявлені електричні властивості дозволяють застосовувати для їх видалення у випадку розташування на поверхнях електрофоретичні технології, детально описані у попередніх розділах.

ВИСНОВКИ

Запропонована концепція дезактивації від макромолекулярних забруднень, яка базується на положенні про адсорбування забруднюючих компонентів на мікро-механічній системі оточуючих пилових конгломератів. Запропонована модель формування динаміки мікрочастинок різної природи під впливом зовнішнього однорідного і неоднорідного електричних полів із маніпулюємими параметрами та отримані її аналітичні розв'язки.

На підставі отриманих розв'язків наочно продемонстрована та детально обговорена можливість гібридної технології тонкої пило-очистки, яка базується на поетапній генерації левітаційної та електро-форетичої динаміки зовнішнім неоднорідним електричним полем. Визначені параметри, як внутрішні, так і зовнішні, які впливають на умови та критерії відповідних динамічних процесів. Проаналізовані шляхи оптимізації (зменшення штатних напруг) параметрів левітаційно-електрофоретичних технологій та запропоновані їх застосування для тонкої пило-очистки в умовах зменшеної гравітації. Проведений порівняльний аналіз ефективності запропонованої технології у порівнянні із традиційними електрофільтрами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Aliotta F., Gerasymov O., Calandra P. Electrospray Jet Emission: An Alternative Interpretation Invoking Dielectrophoretic Forces // Ch.3, pp.51-90. In: *Intelligent Nanomaterials*, 2nd ed. Wiley, USA, 2017, 581p.
2. Gerasymov O.I., Chernilevska I.A. Levitation and jet-stream of micromechanical conglomerations in electric field // P.17. In: VIII Conference of
3. Aliotta F., Gerasymov O., Calandra P. Electrospray Jet Emission: An Alternative Interpretation Invoking Dielectrophoretic Forces // Ch.3, pp.51-90. In: *Intelligent Nanomaterials*, 2nd ed. Wiley, USA, 2017, 581p.
4. Gerasymov O.I., Chernilevska I.A. Levitation and jet-stream of micromechanical conglomerations in electric field // P.17. In: VIII Conference of Young Scientists Problems of Theoretical Physics (12 - 14 December, 2017), BITP, Kyiv, Ukraine.
5. Gerasymov O., Aliota F., Vasi C., Chernilevska I. Liquid and granular streams, manipulated by external inhomogeneous electric field // P. 103. In: Abstracts of 8th International Conference “Physics of Liquid Matter: Modern Problems” (PLMMP-2018), 18-22 May 2018, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine.
6. Gerasymov O.I., Aliotta F., Vasi C., Chernilevska I.A. Universal microparticle dynamics in non-uniform electric fields (from liquid to granular jet) // 6th International Conference "Nanotechnologies and Nanomaterials" (NANO-2018), 27-30 August 2018, Institute of Physics, Kyiv, Ukraine.
7. T. Jones, *Electromechanics of Particles*. (Cambridge University Press, Cambridge, 1995). (ИТ)
8. T. Jones, M. Washizu, *Multipolar dielectrophoretic and electrorotation theory*, *J. Electrostat.***37**, 121–134 (1996). (ИТ)
9. T. Jones, *Basic theory of dielectrophoresis and electrorotation*, *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* **22**, 33–42 (2003). (ИТ)
10. Pohl H.A. Dielectrophoresis. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1978. 720 p.
11. Calle, Carlos I., Arthur Cheng-Hsui Chen and Steve Trigwell. “Dust Particle Removal by Electrostatic and Dielectrophoretic Forces with Applications to NASA Exploration Missions”. Conference: Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics. Volume: 01 (2008).
12. Masuda, S., Washizu, M., Kawabata, I., “Movement of Blood Cells in

- Liquid by Nonuniform Traveling Field”, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, **24**, No. 2, pp. 217-222 (1988)
13. Baofu Qiao, Monica Olvera de la Cruz. Enhanced Binding of SARS-CoV-2 Spike Protein to Receptor by Distal Polybasic Cleavage Sites. *ACSNano* 2020; 14: 10616-10623
14. Clausen T.M., Sandoval D.R., Spliid C.B., et al. SARS-CoV-2 Infection Depends on Cellular Heparan Sulfate and ACE2. *Cell*. 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.09.033>
15. Yan R., Zhang Yu., Li Ya., Lu Xia, Guo Yi., Zhou Q. Structural basis for the recognition of SARS-CoV-2 by full-length human ACE2. *Science*. 2020; 367: 1444–1448.
16. Casalino L., Gaieb Z., Goldsmith J.A., Hjorth C.K., et al. Beyond shielding: the roles of glycans in SARS-COV-2 spike protein. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.06.11.146522>
17. MacCuspie R.I., Nuraje N., Lee S.Y., Runge A., Matsui H. Comparison of electrical properties of viruses studied by ac capacitance scanning probe microscopy. *J. Am. Chem.* 2008; 130(3):887-891. doi: 10.1021/ja075244z.
18. Al Ahmad M., Mustafa F., Ali L.M., Rizvi T.A. Virus detection and quantification using electrical parameters. 2014; *Sci. Rep.* 2008; 4:6831; doi: 10.1038/srep06831
19. Kim J.Y. Ahn J.H., Moon D.I., Park T.J., Lee S.Y., Choi Y.K. Multiplex electrical detection of avian influenza and human immunodeficiency virus with an underlap-embedded silicon nanowire field-effect transistor. *Biosens Bioelectron.* 2014; 55: 162-167. doi: 10.1016/j.bios.2013.12.014.
20. Patolsky F., Zheng G., Hayden O., Lakadamyali M., Zhuang X., Lieber C.M. Electrical detection of single viruses. *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)*. 2004; 101: 14017–14022. doi: 10.1073/pnas.0406159101