

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської підготовки
Кафедра загальної та теоретичної фізики

Магістерська кваліфікаційна робота

на тему: «ЕЛЕКТРОФОРЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАНІПУЛЮВАННЯ
МІКРО-МЕХАНІЧНИМИ КОНГЛОМЕРАЦІЯМИ»

Виконав студент 2 курсу групи МТЗ-19
спеціальності 183 «Технології захисту
навколишнього середовища»
Цушко Володимир Євгенович

Керівник д.ф-м. н., професор
Герасимов Олег Іванович
Рецензент д.ф-м. н.
Ковальчук Володимир Володимирович

Одеса 2020

МІНІСТРЕСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет магістерської підготовки

Кафедра загальної та теоретичної фізики

Рівень вищої освіти магістр

Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища

(шифр і назва)

(наказ № 194-С, від 16.10.2020)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри загальної

та теоретичної фізики

Герасимов О. І.

“_26_”10_2020 р.

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Цушко Володимир Євгенович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: *Електрофоретичні технології маніпулювання
мікро-механічними конгломераціями*

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

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

затвердженні наказом вищого навчального закладу від «16» жовтня
2020 року № 194-С

2. Срок подання студентом роботи 10 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи

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

1. Описання основних вирішень проблем вилучення пилових конгломератів за допомогою зовнішнього маніпулюємого електричного поля (тонка пилоочистка). 2. Схема левітаційно-електрофоретичної моделі. 3. Застосування її у технологіях вилучення мікро-механічних забруднень. 4. Надання порівняльного аналізу існуючих моделей тонкої очистки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним значенням обов'язкових креслень): Таблиця 1.1. -Таблиця розміру частинок. Таблиця 2 - Порівняння зсувів, які викликані Броуновським рухом та гравітаційним осадженням. Рис. 2 - Діелектрофорез у вигляді перлинних ланцюгів: (а) перед застосуванням електричного поля; (б) під час застосування. Рис. 3 -Схематичне зображення діелектрофоретичного пристрою. Рис 4. - Застосування електрокінетичних явищ. Рис.5. Принцип очищення повітря – осадження частинок під дією електричного поля. Рис.6 Розподіл частинок аерозолі в дихальних шляхах людини

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 26.10.2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів дипломного проекту (магістерської роботи)	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання	
			За 4-х бально ю шкало ю	%
1	Огляд новітніх літературних джерел за темою дипломного проекту	3 1.10.2020	4	75 добре
2	Узагальнення основних теоретичних положень проекту	26.10.2020	4	75 добре
3	Рубіжна атестація	16 – 21.11.20 р	4	75 добре
4	Попередній захист кваліфікаційної роботи	14.12.2020	4	75 добре
5	Перевірка на плагіат	12.-14.12.2020	4	75 добре
6	Рецензування	21.- 22.12.2020	4	75 добре
7	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		4	75,0

Студент _____ **Цушко В. Є.**

(підпис)

(прізвище та ініціали)

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

(підпис)

(прізвище та ініціали)

:

АНОТАЦІЯ

Електрофоретичні технології маніпулювання мікро-механічними конгломераціями.

Актуальність теми. У постановці задач про навколишнє середовище ми маємо справу з різноманітними багатокomпонентними системами. Огляд технологічних процесів з маніпулювання мікро-механічними частинками у середовищі за участю електрофорезу та левітаційних сил надає можливість побудувати модель поєднання двох компонентів у процесі управління мікрочастинками, що надасть більшу ефективність процесу маніпулювання частинками в цілому у різноманітних сферах застосування. Тому тема роботи є актуальною для задач галузі і створює інтерес у загальному сенсі теоретичної фізики.

Мета магістерської роботи. Метою данної роботи є огляд, аналіз сучасних технологій управління рухом мікрооб'єктів (мікро-механічних частинок, молекул, клітин). Також дослідження дій електричного поля на конгломерації частинок з метою теоретичного моделювання алгоритму процесу руху частинок під дією електрофоретичних та левітаційних сил і розробки технології маніпулювання конгломераціями, які можуть бути застосовані в мікроаналитичних приладах і пристроях.

Ключові слова: електрофорез, левітація, електричне поле, мікро-механічні частинки, конгломерація частинок.

Науковий керівник: д.ф-м. н., професор Герасимов О. І.

Робота містить:

Сторінок - 46

Таблиць – 2

Рисунків - 6

SUMMARY

Electrophoretic technologies for manipulating micro-mechanical conglomerations.

Topic Relevance. In setting most environmental problems, we deal with a variety of multicomponent systems. Relevance of the topic. In setting environmental problems, we deal with a variety of multicomponent systems. Overview of technological processes for manipulation of micro-mechanical particles in the environment with electrophoresis and levitation forces provides an opportunity to build a model of combining two components in the process of microparticle control, which will make the process of manipulation of particles in general in various applications. Therefore, the topic of the work is relevant to the problems of the field and creates interest in the general sense of theoretical physics.

The purpose of the master's thesis. The purpose of this work is a review, analysis of modern technologies for controlling the movement of microobjects (micro-mechanical particles, molecules, cells). Also, the study of the effects of the electric field on the conglomeration of particles in order to theoretically model the algorithm of the process of particle motion under the action of electrophoretic and levitation forces and develop technology for manipulating conglomerations that can be used in microanalytical instruments and devices.

Key words: electrophoresis, levitation, electric field, micro-mechanical particles, particle conglomeration.

Scientific adviser: Ph.D. Professor, Gerasymov O.I.

The work contains:

Pages - 46

Tables – 2

Drawings - 6

References - 25

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ОГЛЯД.....	14
2 ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ	15
2.1 Теорія електрофорезу.....	15
2.2 Діелектрофорез як засіб маніпулювання мікрочастинками.....	17
2.3 Теорія левітації у зовнішньому неоднорідному електричному полі	21
2.4. Огляд технологій з маніпулювання мікрооб`єктами та мікро-механічними в умовах прикладеного зовнішнього електричного поля.....	27
3 ФОРМУВАННЯ ТА ВИВЕДЕННЯ ПОТОКІВ МІКРОЧАСТИНОК ЗА ДОПОМОГОЮ МАНІПУЛЮЄМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.....	32
3.1. Модель поєднання електрофоретичних та левітаційних сил у процесі управління конгремаціями частинок.....	32
4 ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАНЬ ЗАПРОПОНОВАНОГО АЛГОРИТМУ...37	
ВИСНОВКИ	43
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	44

ВСТУП

Конгломерації з мікро-механічних частинок завдають досить велику шкоду у роботі приладів у різних сферах діяльності людини з мікропроцесами, також у вимірюванні показників Землі для прогнозування клімату, та завдають шкоду здоров'ю людини в цілому вмістом у конгломереціях пилу мікро та нано-частинок, серед яких є і віруси. Тому поглиблене вивчення процесів координації руху частинок за рахунок прикладеного електричного поля та розробка технологій з контролю та маніпулювання такими конгломерациями є досить важливою і необхідною.

Одним з основних забруднювачів у містах та приміщеннях є тверді мікромеханічні частинка. До них належать не тільки звичайні пилові частинки, а й цілий спектр інших, що завдають прямий вплив на здоров'я людини - алергени, сажа, віруси, бактерії і інше.

На цей час розподіл розмірів викидів пилових мікрочастинок погано вивчений. Ця невідповідність вирішується шляхом виведення простого теоретичного виразу розподілу частинок за розмірами. Цей вираз базується на фізиці масштабно-інваріантної фрагментації крихких матеріалів.

Діаметр, мкм	Швидкість осадження, м/с
0,1	$8,71 \cdot 10^{-7}$
0,2	$2,27 \cdot 10^{-6}$
0,4	$6,85 \cdot 10^{-6}$
1,0	$3,49 \cdot 10^{-5}$
2,0	$1,29 \cdot 10^{-4}$
2,5	$1,98 \cdot 10^{-4}$
4,0	$5,00 \cdot 10^{-4}$
10	$3,03 \cdot 10^{-3}$
20	$2,20 \cdot 10^{-2}$
40	$4,71 \cdot 10^{-2}$
100	$2,47 \cdot 10^{-1}$

Таблиця 1.1. - Таблиця розміру частинок[1].

В роботі розглянемо мікро-механічні об'єкти з розміром в межах від середнього до мікрочастинок.

Середній розмір частинок - в межах до 10 мікрон:

- повільно падають з повітря (осідають на підлогу і горизонтальні поверхні);
- включають квітковий пил, великі бактерії, частки золи в повітрі, вугільний пил, дрібний пісок, і дрібний пил;
- частинки, які через дихальні шляхи потрапляють в легені, але не потрапляють в зону газообміну і не всмоктуються в кров. Зашлаковують легкі, можуть викликати рак, астму, алергічні реакції.
- Затримуються фільтрами тонкого очищення.

Дрібні частинки - менше 1 мікрона:

- Дуже повільно падають з повітря (осідають на підлогу і горизонтальні поверхні). У спокійній атмосфері процес може зайняти від днів до років для осідання. У збудженій атмосфері вони можуть ніколи не осісти;
- включає віруси, дрібні бактерії, металургійну кіптява, сажу, пари масла, тютюновий дим, кіптява;
- частинки, які проникають в зону легких, що відповідає за газообмін. Через альвеоли можуть всмоктуватися в кров, викликаючи зашлаковиваніє серцево-судинної системи, алергічні реакції, інтоксикацію адсорбованими на поверхні частинок хімічними сполуками.

Мікроскопічні частинки розміром від 200 до 0,1 мк, як і всі інші тіла підкоряються закону тяжіння. Але внаслідок відносно великій поверхні на одиницю маси вони відчують великий опір повітря і тому не осідають з постійною швидкістю по закону Стокса. На початку падіння сила тяжіння врівноважує опір повітря, подальше збільшення швидкості падіння внаслідок цього припиняється і мікроскопічна частка осідає з постійною незначною швидкістю, вимірюваної сантиметрами або міліметрами на годину. Опір повітря при русі в ньому частки змінюється в залежності від її розмірів і форми, швидкості її осідання і рухливості повітря.

Швидкість падіння кварцовою частки в нерухомому повітрі в залежності від розмірів показана в табл. 1. Як видно з таблиці 1, в нерухомому повітрі кварцові частинки діаметром 10 мк осідають повільно, а частки менше 0,1 мк практично не осідають і перебувають в постійному броунівському русі. Таким чином, чим менше розмір пилових частинок, тим довше вони затримуються зваженими в повітрі, отже, тим більша ймовірність потрапляння їх в дихальні шляхи. Деякі зміни швидкості осідання частинок пилу виникають в зв'язку з процесом флокуляції. Це має значення в основному для аерозолів конденсації, які навіть в нерухомому повітрі завдяки енергійному броунівському русі часто стикаються один з одним, агрегуються і вигляді пластівців випадають з повітря [2].

Різноманіття мікроскопічних характеристик частинок таких як розмір, форма, заряд, довжина ланцюга тощо, можуть значно впливати на фізичні властивості системи. Таким чином, краще розуміння взаємного впливу цих факторів допоможе у проектуванні матеріалів з потрібними властивостями.

Аерозолі мінерального пилу, що ерозуються від посушливих ґрунтів, впливають на погоду і клімату шляхом розсіювання та поглинання випромінювання та шляхом зміни властивостей хмари. Осадження пилових аерозолів також частково контролює продуктивність та поглинання вуглецю океанічних екосистем, забезпечуючи обмежувальні мікроелементи, такі як залізо, яке впливає на атмосферні концентрації теплих газів. Загальний вплив пилових аерозолів на випромінювач Землі бюджет становить важливу невизначеність у розумінні минулі та прогнозування майбутніх кліматичних змін. В додаток, пилові аерозолі негативно впливають на здоров'я людини. Всі ці процеси залежать від розміру атмосферного пилу аерозолу, що також визначає час його життя. Але поточний обробки розподілу часток за розміром (PSD) викидів пилові аерозолі в моделях глобальної циркуляції (GCM) базуються на емпіричні відносини з обмеженою фізичною основою або без неї. Таке використання емпіричних відносин необхідно як через

дефіцитність вимірюван і тому, що розуміння фізичних процесів, що визначають виділений пил, PSD становить, уже обмежена. [3].

Існує безліч аналітичних методів управління частинками, молекулами, іонами, які засновані на впливі зовнішніх полів на мікрочастинки. Широко розповсюдженими можна вважати фільтраційні і хроматографічні методи, ультразвукові методи, електрофорез, діелектрофорез і т. п. Останнім часом ці методи успішно використовуються в мікроаналітичних приладах, що дозволяють здійснювати унікальні маніпуляції з мікрокількостями речовини і мікрочастинками. Області застосування подібних приладів надзвичайно широкі: аналітична хімія, медичний аналіз, фармацевтичні дослідження, біотехнологія, судова медицина та криміналістика, екологічний моніторинг.

Електрофоретичні методи, ідеально подаються автоматизації, застосовуються для розділення біологічних молекул в однорідному електричному полі.

При поділі і аналізі мікрочастинок (молекул) використовуються різновиди методів мікро-хроматографії, фільтрації і капілярного електрофорезу.

Найбільш важкими об'єктами для дослідження є мікро і нано частинки, що представляють собою складний об'єкт вивчення. Аналіз змісту і поведінки окремих частинок важливий для фундаментального розуміння їх функцій в навколишньому середовищі.

В даний час тільки обмежена кількість методів застосовується для маніпуляцій мікрочастинками. За допомогою методів мікро- і нанотехнологій можна створити в матеріалах різноманітні конструкції фільтрів, наприклад, безліч постів, звивистих каналів, фільтрів в формі гребінки і ступеневої типу, з метою ефективного розподілу одних частинок від інших. Перевага мікрофільтрації полягає в тому, що цей процес не вимагає створення певних буферних умов поділу.

Електрофорез не дозволяє відтворено розділити частки і клітини з яких-небудь параметрами. Тому при поділі мікрочастинок зазвичай

застосовують різні варіанти діелектрофореза (DEP) [4]. На відміну від мікрофільтрації діелектричне поділ не обмежена відмінностями в розмірах між клітинами або частками. В принципі, різні види мікрочастинок можуть бути відокремлені з однієї і тієї ж конструкцією електрода при підборі відповідної частоти для кожного типу клітини. Переваги діелектрофореза в гнучкості, контрольованості і зручності для автоматизації.

Розвиток мікро- і нанотехнологій, створення низькорозмірних функціональних структур (каналів, реакторів, змішувачів, фільтрів, колонок, насосів, датчиків і т.п.), синтез нових наноматеріалів дають можливість отримати мікроаналітичні пристрої, які підходять для вивчення окремих частинок і клітин. Порівняно недавно з'явилися нові методи і підходи, що забезпечують можливість ефективного впливу на частинки за допомогою зовнішніх полів [5].

1 ОГЛЯД

Мікромініатюризація, а в останні роки навіть наномініатюризація - магістральний напрям розвитку мікроелектроніки, біоелектроніки. Як наслідок, нові технології вимагають все більшої чистоти процесу – чистоти обладнання, матеріалів, повітря, води і т.д. Надзвичайно важливо зменшити кількість сторонніх частинок, що контактують з поверхнею виробів мікроелектроніки на всіх стадіях їх виготовлення. Використання електрофорезу і технічної левітації під дією електричного поля в середовищі - ідеальне рішення цієї задачі.

Технологічні процеси, які використовуються нині при виготовленні класичних мікросборок, базуються на механічних контактах, наслідком чого може бути їх руйнування. Безконтактні методи виключають високу локальне тиск, має місце при механічному контакті. Тому з'являється можливість маніпулювати проблемними компонентами (мікронних розмірів).

2 ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

Об'єктом дослідження в роботі є визначення та аналіз технологій, які впливають на маніпулювання конгломераціями мікро-механічних частинок в умовах прикладеного електричного поля та розробка алгоритму поєднання електрофоретичних та левітаційних властивостей у процесі формування струмів мікрочастинок за допомогою маніпулюємого електричного поля.

Залучається механізм електрофореза для створення дрейфових потоків (струмів) з мікрочастинок. Розглядаються левітаційні властивості поведінки конгломерацій часток у зовнішньому неоднорідному полі. Теоретично вивчається та модулюється можливість поєднання процесу електрофорезу та левітації в маніпулюванні мікро-механічними конгломераціями.

Мета роботи полягає в дослідженні дій електричного поля на конгломерації мікро-механічних частинок з метою фізичного моделювання процесу їх руху і розробки технології маніпулювання конгломераціями мікрооб'єктів з метою управління потоками часток для забезпечення очищення середовища від забруднюючих домішок та небезпечних бактерій та вірусів.

2.1 Теорія електрофорезу

Електрофорез – це рух частинок під дією електричного поля та переміщення негативно заряджених частинок дисперсної фази. Електрофорез являє собою метод, який використовується для поділу молекул за допомогою електричного поля.

- Швидкість і напрямок руху частинок в електричному полі залежить від розміру молекули і електричного заряду.
- Зазвичай електрофорез використовується для поділу макромолекул.

З електрофорезом виникають два основні чинники, які контролюють, як швидко частка може рухатися і в якому напрямку. По-перше, питання

вибірки. Негативно заряджені частинки притягуються до позитивного полюса електричного поля, в той час як позитивно заряджені частинки притягуються до негативного кінця. А нейтральні частинки можуть бути іонізованими, якщо поле є досить сильним. В іншому випадку, як правило, не можуть бути порушені. Іншим фактором є розмір частинок. У той час як заряджена частка притягуються до протилежного заряду в електричному полі, є й інші сили, які впливають як частинка рухається [6].

Вираз для швидкості руху частинок під дією зовнішнього електричного поля, відоме як рівняння Гельмгольца – Смолуховського.

Розрахунок швидкості електрофорезу для великих частинок ($r_p \gg r_D$) дає

$$V = \frac{\varepsilon E \xi}{4\pi\eta} \quad (2.1)$$

где η - вязкость среды;

ε - диэлектрическая проницаемость;

ξ - электролитический потенциал.

E_0 – напруженність електрического поля

З виникненням і зростанням поверхневої провідності електрофорез знижається.

Фізичний ефект проявляється в обсязі з високодисперсною колоїдною системою, в якій межують тверда і рідка дисперсні фази. Електричне поле направлено вздовж кордонів фаз і викликає зсув одного іонного шару по відношенню до іншого. Сили прикладені до заряджених частинок. Частинки рухаються в рідкій фазі у напрямку до відповідних електродів [7].

Електрофорез не дозволяє відтворено розділити частинки з яких-небудь параметрами. Тому при поділі часток зазвичай застосовують різні варіанти діелектрофореза (DEP) [2]. Через простоту DEP широко використовується в мікроскопічних приладах для розділень бактерій [6], ракових клітин [8], стовбурових клітин [9] і субпопуляцій лейкоцитів [5]. На відміну від мікрофільтрації діелектричне поділ не обмежена відмінностями в розмірах між клітинами або частками.

2.2 Діелектрофорез як засіб маніпулювання мікрочастинками

В основі діелектрофореза (Dielectrophoresis, DEP) [10] лежить явище взаємодії частинок з неоднорідним електричним полем в середовищі, що є активним підходом до поділу. Так, в змінному електричному полі клітини виявляють різні діелектричні властивості в залежності від характеристик цього поля. Тому, вибираючи відповідну частоту поля для зразка, можна розділити різні типи клітин і зосередити в різних областях мікроелектродів в залежності від їх індивідуальних діелектричних відгуків на прикладається електричне поле.

Діелектрофоретична сила полягає у взаємодії неоднорідного електричного поля з дипольним моментом, який він індукує в об'єкті. Типовий випадок – індукований диполь у діелектричній сферичній частині.

На відміну від електрофорезу, DEP може відбуватися з нейтральними частинками в цілому і тільки в неоднорідних електричних полях (або під дією постійного струму). Ефект DEP можна розглядати в двох частинах; перша - поляризація, яка викликає утворення диполів в частка, а друга - поступальний рух (Pohl 1973).

Є додаткові електрокінетичні ефекти, що виникають в неоднорідні електричні поля, хоча тут вони не розглядаються більш докладно. Ці процеси, такі як електровращеніє, електропорація і електрострикція обговорювалося раніше іншими дослідниками (Арнольд і Ціммерманн 1988; Нойман та ін. 1989; Поль 1973; відповідно).

Основні принципи діелектрофорезу.

Якщо розглянути мікрочастинку (біологічний об'єкт - клітку, складні молекули, ДНК), як конгломерат молекули, представлену у відєодиполеї, на кажучу молекулу, розміщену в електричному полі з напругою E , діє сила F . Суммарна сила, що призводить до руху мікрочастинок, складеться з окремих електрокінетичних сил. Крім цього, для подібних мікрочастинок характерні

особливі властивості, наприклад, подвійний електричний шар, який оточує мікрочастинку і розміщується у зовнішньому електричному полі.

Тож, сумарна електрична сила, що діє на частинку з розподіленим зарядом Q в неоднорідному електричному полі E , визначається напруженістю цього поля і може бути розрахована за такою формулою:

$$\vec{F} = Q\vec{E} + \delta q\vec{E}(r_+) - \delta q\vec{E}(r_-) = Q\vec{E} + (m\nabla)\vec{E}, \quad (2.2)$$

де ∇ - векторний набла-оператор;

m – дипольний момент частинки.

У випадках, коли частинка не має заряду або при частотах поля ω вище 1 кГц (коли електрофоретичні ефекти незначні), права частина рівняння (містить дипольний момент і градієнт електричного поля) значно переважає, і тому усереднену за часом силу можна виразити як:

$$F(\omega) = \text{Re}|m(\omega)|\nabla E^2 / 2E \quad (2.3)$$

Діелектрофоретична сила залежить від розміру частинки, від величини і ступеня неоднорідності прикладеного електричного поля (градієнт амплітуди або фази). Діелектрофоретична сила виникає тільки в разі неоднорідних полів. В інших випадках сила дорівнює нулю [11].

Найпростіший спосіб створення незалежного електричного поля для діелектрофорези - це застосування електродів різної форми. Сучасні методи мікро- та нанотехнологій дозволяють отримувати любую геометрію електродів у нужному об'ємі. Теорія позитивного DEP передбачає що частинки збираються в зонах високої нерівномірності. Тому друга частинка може притягуватися до цих вторинних нерівномірні ефекти поля навколо першої частинки і так утворюються ланцюжок частинок (рис. 2).

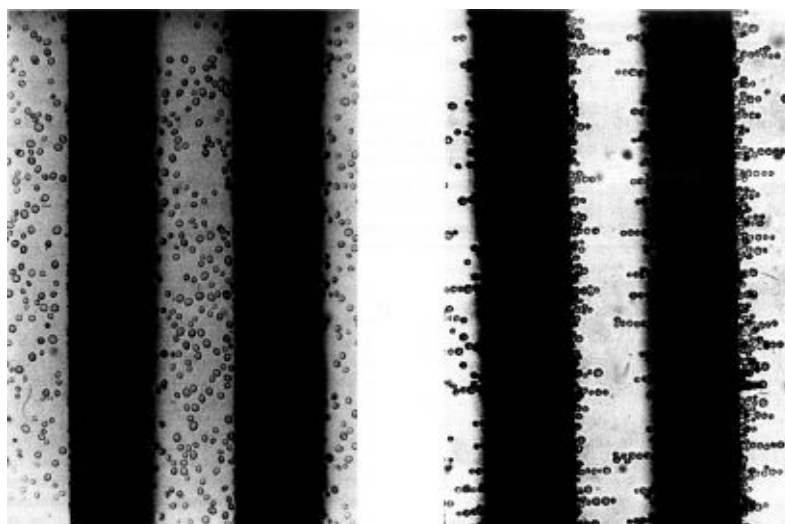


Рис. 2 - Діелектрофорез у вигляді перлинних ланцюгів: (а) перед застосуванням електричного поля; (б) під час застосування.

Діелектрофоретична сила рухається лише в разі неоднорідних полей. В інших випадках сила равна нулю. Найпростіший спосіб створення незалежного електричного поля для діелектрофорези - це застосування електродів різної форми. Сучасні методи мікро- та нанотехнологій дозволяють отримувати любую геометрію електродів у нужному об'ємі. Існують різноманітні конструкції електродів, але найпоширенішими є поєднання пластинів тих та ігольчатих електродів. Вблизи пластинчатого електрода формується електричне поле з меншою напруженістю, в той час як у ігольчатого формується поле з більшою напруженістю.

Статегії розділення мікрочастиц.

У роботі [12, 13] розглядаються деякі стратегії розділення частин, які можуть бути реалізовані в мікросистемах:

- 1) розділення частиц в струмі;
- 2) диелектрофоретичне фракціонування в струмі пилу
- 3) покрокове розділення струму;
- 4) діелектрофорез "бігучої хвилі" (Діелектрофорез "Мандрівна хвиля") та ін.

Простіша реалізація першого способу розділення - використання майданчиків з безліччю електродів, через які проходить потік з сумішшю частинок. Частина частинок під дією позитивного диелектрофореза затормажується, а прочі частинки проходять через площадку, не змінюючи

швидкості (Рис. 3). При діелектрофоретичному фракціонуванні в польових потоках використовують заперечний діелектрофорез як силу, що забезпечує охорону частинок на некотором розстановці від поверхонь електродів. При цьому на частині діють сили тяжіння, гідродинамічної та діелектрофоретичної сили, що дозволяє розподіляти частинки відповідно до їх властивостей, розташованих над поверхнею електродів. Іноді цей принцип називається принципом гіперслойного розподілу. Подібні пристрої використовувались для демонстрації фракціонування латексних шариків, бактерій та ракових кліток. Поступове розділення в потоках здійснюється за допомогою спеціальних діелектрофоретичних крокових сепараторів - конструкцій електродів у вигляді гребенки (рис. 3). Частинці з більшою провідністю розташовуються в областях з високою напруженістю полів (позитивний діелектрофорез), утворюючи скопління у вигляді бус. Частинці з меншою провідністю розпливаються в областях з низькою напруженістю полів, що утворюються при цьому характерних дельтовидних скопленнях. Чередування циклів подачі та зняття напруги з потоками, вимиваючими частинами, сприяє ефективному розділенню частин. При розподілі частин способом діелектрофорези "бігучої вовни" застосовується зміна градієнта фаз електричного поля, забезпечується конструкція підводних електродерев, виконаних у вигляді спіральних електричних майданчиків.

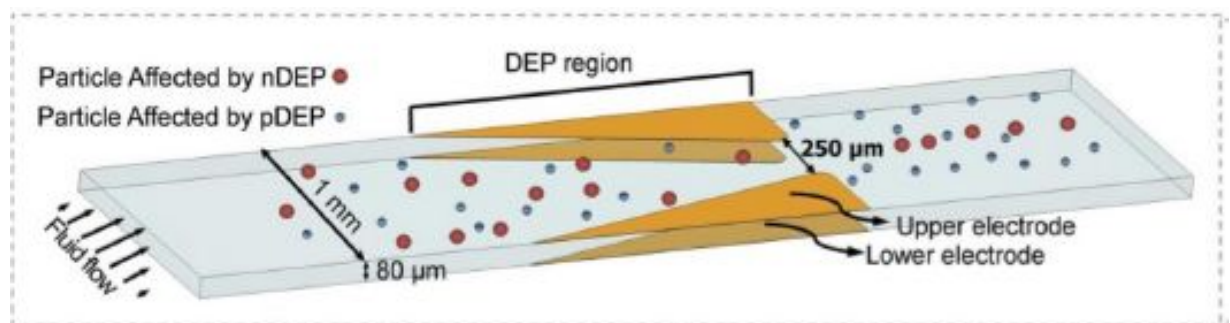


Рис. 3 - Схематичне зображення діелектрофоретичного пристрою.

Електроди формують так, що створюють чотири сполучені в спіралі електродвигуни, на яких подаються електричні сигнали з підключеним фазом. Це дає можливість отримати кероване електричне поле. Частинці всередині такої конструкції випробовують силу, простягаючи їх або до

центру спіралі, або від центру. Таке пристрій полезно для виявлення окремих частин, оскільки вони можуть бути переміщені до центру та сконцентровані з порівняно великих областей, інші ж частини можуть бути видалені. Діелектрофоретичне розділення частинок може здійснюватись та іншими способами. Наприклад, вздовж каналу розташовані електроди, що формують перехідне електричне поле перпендикулярно для створення руху потоку частинок. Поєднання ламінарного потоку частинок з позитивним або негативним діелектрофорезом частинок призводить до того, що одні з них замінюються в стенках капіляра або каналу, а інші прискорюються в центрі каналу (негативний DEP). Вищезазначені стратегії розподілу частинок в мікрочипах, звичайно, не охоплюють усі способи, які застосовуються в даний час [4].

2.3 Теорія левітації у зовнішньому неоднорідному електричному полі

В нашій роботі процес левітації під дією неоднорідного електричного поля представлений як можливий засіб для під'йому конгломерація мікромеханічних частинок над поверхнею підложки та тимчасове зависання над нею для подальшого управління струмом частинок.

Левітація - явище, при якому об'єкт займає фіксоване положення в гравітаційному полі без переваги підтримка шляхом безпосереднього фізичного контакту з іншими предметами, і не обов'язково передбачає магнетизм. Брандт дав всебічний огляд левітації у фізиці у 1989 рік. [13, 14]

Один із методів визначення властивостей і параметрів частинок, для можливого управління їми, передбачає левітацію поляризованих частинок зовнішнім електричним полем.

1. Левітація частинки в різних середовищ і різноманітних геометрій широко досліджували в минулому. Мета цих досліджень була з'ясувати умови стійкості левітації та ефекту геометрії електродів. Теоретичний аналіз в більшість попередніх розслідувань базуються на ефективних дипольна

модель. За допомогою цієї моделі формальний критерій стабільності левітація був визначений.

Коли положення рівноваги левітованої частинки становить стабільна, частинка повертається в положення рівноваги через а невеликий зсув від рівноваги, і можна говорити про власні коливання частинки. Вимірювання частоти цього коливання надають додаткову інформацію, яка може може використовуватися для визначення параметрів системи. Зовнішнє електричне поле викликає поляризацію частинок, завдяки чому левітується частинка.

Загальна особливість розглянутих коливань є особливою залежність частоти коливань частинок від амплітуда зовнішнього електричного поля. Зокрема, коливання частота зменшується, коли амплітуда зовнішнє електричне поле зростає. Ця модель використовується для розрахунку власної частоти частинки, яку левітує інша нерухома частинка. Процес осідання частинок дисперсної фази під дією сили тяжіння називають седиментацією, а системи, де ідуть ці процеси, називають кінетично нестійкими.

Седиментаційний аналіз.

Процес осідання частинок дисперсної фази під дією сили тяжіння називають седиментацією, дисперсні системи, в яких для частинок характерний хаотичний (броунівський) рух, є більш чи менш кінетично стійкими. Осіданню частинок завжди протидіє броунівський рух, який прагне рівномірно розподілити частинки по всьому об'єму системи. Чим менші частинки, тим сильніше виявляється броунівський рух і дифузія. Внаслідок броунівського руху, з одного боку, і дії сили тяжіння, з другого боку, встановлюється седиментаційно-дифузійна рівновага, яка характеризується певним рівноважним розподілом частинок за висотою. Цей розподіл описується рівнянням Лапласа—Перрена:

$$\ln \frac{v_1}{v_2} = \frac{mg(h_2 - h_1)(p - p_0)}{kTp} \quad (2.4)$$

де v_1 і v_2 — частинкові концентрації на висоті h_1 і h_2 ; m — маса частинки; T — температура; ρ і ρ_0 — густина частинок і середовища відповідно; k — константа Больцмана; g — прискорення сили тяжіння. Седиментаційний аналіз - принцип вимірювання, заснований на використанні закону Стокса і реєстрації усталеною, (граничної), швидкості осідання:

$$U_s = \frac{(p_s - p_f)}{18\eta} D^2 g \quad (2.5)$$

За допомогою рівняння нескладно визначити час седиментації.

Закон Стокса справедливий тільки для сферичних частинок і за умови, що в процесі осідання виключаються зіткнення між частинками. Переважна більшість реальних частинок за формою відмінні від сферичної і, таким чином, за рахунок більшої поверхні і підвищеного, (в порівнянні зі сферою), лобового опору будуть седиментувати повільніше, ніж сфери еквівалентного діаметра, (що призводить до артефактних заниження одержуваних результатів).

Для частинок, що мають форму диска, як наприклад каоліни, цей ефект виражений набагато сильніше і заздалегідь можна очікувати істотних відхилень кінцевих результатів від реальних, в бік заниження розмірів

Крім того, при проведенні аналізу тонкодисперсних частинок седиментаційним методом необхідно враховувати Броунівський рух. Закон Стокса застосуємо тільки до гравітаційного осадження частинок. У Таблиці 3 наведено порівняння вкладу цих двох "конкуруючих" процесів: седиментації і броунівського руху [15].

При проведенні аналізу мікро-механічних частинок седиментаційним методом необхідно враховувати Броунівський рух. Закон Стокса может бути прикладений тільки до гравітаційного осадження частинок.

У Таблиці 2 наведено порівняння вкладу цих двох "конкуруючих" процесів: седиментації і броунівського руху.

Смещение за 1 секунду (мкм)						
	В воздухе при 21°C (1 атм)		В воде при 21°C		В воде при 21°C	
Диаметр частиц (мкм)	Броуновское движение*	Гравитационное осаждение**	Броуновское движение*	Гравитационное осаждение	γ	$k = \frac{100\gamma}{\gamma+1} (\%)$
0.10	29.4	1.73	2.36	0.005	31.1	96.9
0.25	14.2	6.3	1.49	0.0346	3.15	75.9
0.50	8.92	19.9	1.052	0.1384	0.556	35.7
1.0	5.91	69.6	0.745	0.554	0.0983	5.0
2.5	3.58	400	0.334	13.84	0.00995	1.0
10.0	1.75	1550	0.236	55.4	0.00031	0.03

* Среднее смещение, определяемое уравнением (7.20)

** Результат гравитационного осаждения для сферической частицы с плотностью 2000 кг/м³, с учётом поправки Канингема γ - определяется уравнением (7.23)

Таблиця 2 - Порівняння зсувів, які викликані Броунівським рухом та гравітаційним осадженням

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Сили, що діють на частинки, зумовлені взаємодією зарядів частинок із зовнішнім електричним полем. В каркас поштучно гладкої моделі, загальний заряд частинки визначається стрибком напруженість електричного поля на поверхні частинок

$$\gamma_T^i = \epsilon_0 \vec{n} \cdot [\vec{E}^i] \quad (2.6)$$

при цьому визначається зовнішнє електричне поле, що діє на частинку неперервним на поверхні частинки компонентом напруженість електричного поля. Отже, вираз для сила, що діє на частинку, звучить так:

$$\vec{F}^i = \int \gamma_T^i (\vec{E}_0 + \vec{E}_c^i) ds \quad (2.7)$$

де $\sim E_0$ - електричне поле, спричинене зовнішнім джерелом в відсутність частинок і $\sim E_c^i$ - електричне поле на поверхні і-ї частинки, яка індукується іншими частинками. Формула крутного моменту, який діє на частинку, читається

$$\vec{M} = \int \gamma_T [\vec{r}(s) \times (\vec{E}_0 + \vec{E}_c^i)] ds \quad (2.8)$$

Неоднорідні магнітні та електричні поля генерують левітаційні сили в магнітних та діелектричних рідинах, завдяки чому частинки розділяються відповідно до їх питомої ваги та магнітних та електричних властивостей відповідно. Відповідні системи називаються магнітогідростатичною сепарацією та мокрою діелектричною сепарацією. Ці сили залежать від напруженості поля та градієнта, а також від властивостей рідини та частинок, що підлягають левітації. У цій роботі розглядається потенційне застосування електричних полів порівняно з магнітним полем. Показано, що якщо не вжити спеціальних заходів, електричне поле поступається настільки, що його застосування не є перспективним. У цьому контексті обговорюються впливи розміру і форми частинок в обох методах [16-20].

Один із методів визначення властивостей і параметрів частинок передбачає левітацію поляризованих частинок зовнішнім електричним полем.

1. Левітація частинки в різних середовищах і різноманітних геометріях було широко досліджувалося в минулому. Мета цих досліджень була з'ясована умови стійкості левітації та ефекту геометрії електродів. Теоретичний аналіз в більшості попередніх розслідувань базується на ефективній дипольній моделі.

2. Розширення аналізу сил, що діють на частинки поза рамками дипольного наближення, завдяки чому члени вищого порядку в багатополосне розширення відносно центрів частинок були здійснені у посиланні.

3. Підхід, прийнятий в останньому дослідженні, справедливий лише у випадку ідеального діелектрика. У цьому дослідженні ми використовуємо більше загальний підхід до визначення сили і крутного моменту, що діє на частинках, яка не обмежена дипольним наближенням і припущення про ідеальний діелектрик. Цей підхід дозволяє вивести замкнуту систему рівнянь для визначення сили, що діють на частинки в різних режимах. Коли положення рівноваги левітованої частинки становить стабільна, частинка повертається в положення рівноваги через а невеликий зсув від рівноваги, і

можна говорити про власні коливання частинки. Вимірювання частоти ці коливання надають додаткову інформацію, яка можеможе використовуватися для визначення параметрів системи [21-23].

Складна геометрія системи, яка була розглядається в посиланні 6 не дозволяє вивести прості формули для залежності власної частоти від амплітуди зовнішнього електричного поля. У цьому дослідженні ми аналізуємо дві прості геометричні конфігурації, коли (i) сферична частинка левітується через силу відштовхування, спричинену іншою нерухома сферична частинка, і (ii) левітація сферична частинка, спричинена відштовхуванням від площини інтерфейс між двома напівпросторами з різною діелектричною проникністю та електропровідністю. Зовнішнє електричне поле викликає поляризацію частинок, завдяки чому вони левітують. Загальна особливість розглянутих коливань є особливою залежність частоти коливань частинок від амплітуда зовнішнього електричного поля. Зокрема, коливання частота зменшується, коли амплітуда зовнішнє електричне поле зростає. Отже, мінімальний частота коливань, які збуджуються з амплітудою зростання, визначається станом перезволоження рух при наявності скінченної в'язкості, при цьому максимальної частота коливань відповідає мінімальній величина електричного поля, яка необхідна для компенсації сила тяжіння.

Слід підкреслити, що в рамках модель із кусково-гладеньким середовищем, не беручи до уваги чітко враховують контакт між частинками, частинками залишаються електрично нейтральними, тобто загальний електричний заряд кожна частинка дорівнює нулю. Розподіл електричного Заряд над поверхнею частинок не проявляє монополя симетрія і вона визначається симетрією електричного поля. Це саме той випадок, який розглядається в нинішнє дослідження. У розділі II, ми описуємо математичну модель та окреслити загальний порядок визначення сил в каркас моделі з фрагментально-гладким середовищем. Ця модель використовується в розділі III для розрахунку власної частоти частинки, яку левітує іншою нерухома частинка. У розділі IV, ми розглянемо випадок, коли

сферична частинка яка вбудована в рідину-хазяїна, левітується над площиною

2.4 Огляд технологій з маніпулювання мікро-механічними та молекулярними частинками в умовах прикладеного електричного поля

До основних технологій ретельного очищення просторів від мікро-механічних частинок, які відбуваються за допомогою зовнішнього маніпулюємо електричного поля відносяться: електричні пиловловлювачі, електрофільтри, плазмові фільтри, тощо.

Використання таких технологій потребує великих електричних затрат, які складають десятки та тисячі вольт. В роботі досліджується шляхи зниження робочих енергетичних напруг на основі левітаційно-електрофоретичної моделі.

Традиційно для вивчення мікрочастинок використовуються електрокінетичні методи. Наявність особливих властивостей призводить до того, що електрокінетичний рух мікрочастинок відбувається за дещо іншими принципами. Електрофорез не дозволяє відтворено розділити різноманітні за властивостям частинки. Тому при розподілі зазвичай використовують різні варіанти діелектрофорезу (DEP) [21]. Через простоту DEP широко використовується в мікрочіпових приладах для розділень бактерій. На відміну від мікрофільтрації діелектричне розділення не обмежена відмінностями в розмірах між частинками. В принципі, різноманітні типи частинок можуть бути відокремлені з однієї і тієї ж конструкцією електрода при підборі відповідної частоти для кожного типу. Переваги діелектрофореза в гнучкості, контролюємості і зручність для автоматизації. У порівнянні з мікрофільтрацією більшість діелектричних поділів вимагає сепараційного буфера з низькою провідністю, що означає, що частинки не можуть бути безпосередньо відокремлені в початковому зразку.

Розвиток мікро- і нанотехнологій, створення низькорозмірних функціональних структур (каналів, реакторів, змішувачів, фільтрів, колонок,

датчиків і т.п.), синтез нових наноматеріалів дають можливість отримати мікроаналітичні пристрої, які підходять для вивчення окремих частинок і клітин. А це в свою чергу обумовлює необхідність ефективного управління рухом окремих частинок і клітин.

Порівняно недавно з'явилися нові методи і підходи, що забезпечують можливість ефективного впливу на частинки в рідині за допомогою зовнішніх полів [17].

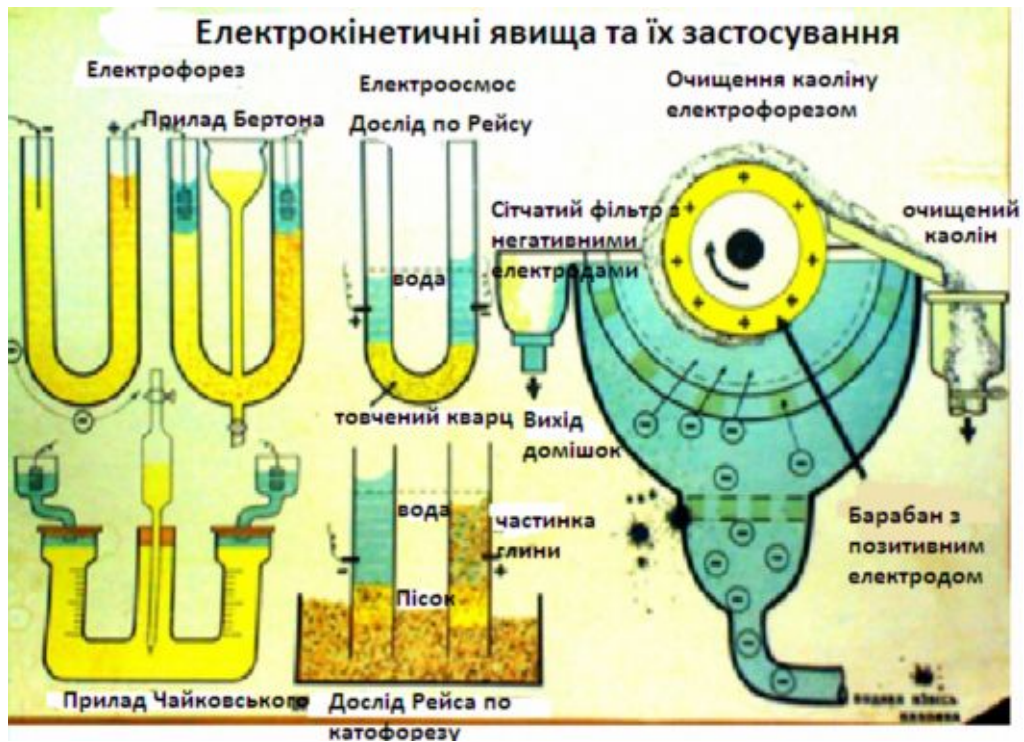


Рис 4. - Застосування електрокінетичних явищ

До електрокінетичних явищ відносяться явища електрофорезу та електроосмосу, а також потенціал седиментації і потенціал течії.

Наявність у частинок дисперсних систем електричного заряду було відкрито ще в 1808 році професором Московського університету Ф. Ф. Рейссом при дослідженні електролізу води.

Райса поставив два експерименту. В одному він використовував U-образну трубку, в іншому занурив у глину 2 скляні трубки.

При пропусценні постійного струму через прилад, що складається з U-подібної трубки, середня частина якої заповнена кварцовим піском, вода в коліні з негативно зарядженим електродом (катодом) піднімалася, що

свідчило про позитивний заряд води. Вода заряджалася при контакті з частинками кварцу. Без діафрагми з піску рух рідини відсутнє.

Плазмові та озонуючі очисники повітря.

На цей час такі очисники повітря досить ефективний і безпечний спосіб знезараження повітря в приміщеннях з постійно присутніми в них людьми. Перше покоління таких приладів відомо як електростатичні очищувачі повітря. До їх числа відносяться в тому числі і широко відомий Супер Плюс Турбо.

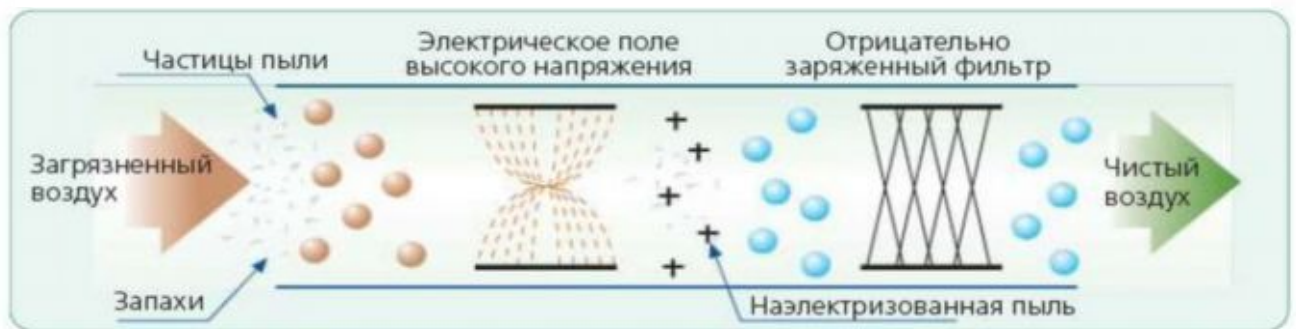


Рис.5. Принцип очищення повітря – осадження частинок під дією електричного поля.

Плазмові очисники - це наступний етап розвитку даної технології. Вони генерують набагато потужніший електростатичний розряд, що очищає здатність якого в десятки і сотні разів перевищує ефективність класичного електростат.

Саме плазмове очищення є однією з найбільш ефективних технологій, яка дозволяє миттєво очистити повітря від будь-яких домішок і знищити всі відомі мікроорганізми.

Особливості конструкції і принципи роботи приладу.

Принцип роботи очищувача-іонізатора Екологія Плюс полягає в виникненні самостійного газового розряду, який виникає під дією електричного струму. Частинки пилу, мікроорганізмів, диму і т.д. затягуються в прилад разом з молекулами повітря. У приладі вони отримують електричний заряд і прилипають до спеціальних осаджувальних пластин касети залишаючись всередині.

Крім того, повітря, який проходить через касету збагачується озоном. Кількість озону, що утворюється при електричному розряді, значно менше гранично допустимих концентрацій, але такої кількості цілком достатньо для придушення життєдіяльності різних видів цвілі, грибка, шкідливих для людини вірусів і мікробів. Прилад одночасно працює і як очищувач, і як іонізатор.

Осаджувальна касета оздібнена додатковим позитивно зарядженим електродом на виході повітря. В касеті відбувається фільтрація «електронного сміття», електромагнітна пастка пропускає тільки «легкі» негативно заряджені аеріони. Знезаражуючий і очищуючий ефект заснований на унікальному за силою впливу озону. Як ми вже відзначали, цей газ є найпотужнішим природним окислювачем і дезинфектором, який по завершенню очищення повністю розпадається на кисень.

Блок плазмового очищення складається з 2 частин:

1. Блок іонізації повітря - це іонізуючий і озонує електрод негативної полярності. Важливо, що в залежності від матеріалу, конструкції і подведеного до електрода напруги кількість генерованого озону і концентрація утворюються іонів може бути різною.

2. Електростатичний блок - металеві пластини, які є осадітельного електродами позитивної полярності. Від площі цих пластин залежить очищає здатність приладу від великої пилу, пилку, сажі та ін.

Механічні забруднювачі, що містяться в повітрі, які проходять через іонізуючий блок, набувають негативний заряд. Через це вони прилипають до позитивно заряджених металевим пластинам. Так відбувається процес очищення повітря від пилу, алергенів і інших механічних забруднюючих речовин.

При цьому знезараження і очищення повітря від летючих хімічних сполук відбувається за рахунок озонації, яка завжди утворюється при роботі іонізуючого блоку.

Таким чином, плазмові очисники забезпечують ефект очищення повітря від механічних частинок за рахунок прилипання до осаджувальних пластин.

3 ФОРМУВАННЯ ТА ВИВЕДЕННЯ ПОТОКІВ МІКРОЧАСТИНОК ЗА ДОПОМОГОЮ МАНІПУЛЮЄМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

3.1 Модель поєднання електрофоретичних та левітаційних сил у процесі управління конгломераціями частинок.

Теоретична модель управління конгломераціями частинок представлена на основі таких явищ як електрофоретичного руху та левітація, Такі умови створюються за допомогою зовнішнього електричного поля. Процес левітації означає, що пилова конгломерація в електричному полі піднімається над поверхнею і зависає над нею. Процес електрофорезу, який поєднується з процесом левітації, спричиняється за рахунок поляризації частинок руху, наведений диполем запропонованим електричним полем. І таким чином, отримуємо відразу комбінування двох ефектів: левітацій тобто підйом пилу та вибудовування електропилової конгломерації, яка витягується із зовнішнього електричного поля та електрофоретичного.

Розглянемо таку теоретичну модель. Існує поверхня і на ній зависають частинки, на яких діє гравітаційне поле і прикладене неоднорідне електричне поле. Електрод перший – точковий, а інший, це сама заряджена поверхня на якій лежить пил. На поверхню прикладається електричне поле, яке спричиняє завислий шар речовини (пил), незважаючи на гравітаційне поле. Такому зависанню сприяє умова, коли середнє значення радіуса вектора прагне до постійної величини ($\langle r \rangle = const$). Складаємо рівняння руху частинки пилу:

- для електрофорезу (частка заряджена)

$$m\ddot{\vec{r}} = m\vec{g} + q \cdot \vec{E} + \chi \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (3.1)$$

З рівняння (3.1) видно, що на частинку діє сила тяжіння $m\vec{g}$. Так як частинка заряджена, то вона має вигляд $q \cdot E\vec{h}$. Якщо частинка рухається в просторі (в повітрі), то вона відчуває силу тертя. Її важко змоделювати в

загальних випадках, але вона пропорційна швидкості $\frac{d\vec{r}}{dt}$ (малі швидкості).

Тому можна додати силу тертя у вигляді коефіцієнта $\chi \frac{d\vec{r}}{dt}$.

Якщо частинка не заряджена, то діє інша сила. Вона пропорційна градієнту від квадрата напруженості. Тому рівняння набуває такий вигляд:

- для діелетрофору (частинка не заряджена)

$$m\ddot{\vec{r}} = m\vec{g} + \gamma \cdot \vec{\nabla}(\vec{E}^2) + \chi \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (3.2)$$

Знаходимо рішення для виразу (3.2):

$$m\ddot{z}_u = mg - |\chi|z_t + \gamma \frac{d}{dz}(E^2) \quad (3.3)$$

$$\ddot{z}_u + |\chi|\dot{z}_t = g + \gamma \frac{d}{dz}(E^2) \quad (3.4)$$

Запишемо рівняння (3.3) у наступному вигляді (тобто промодельємо прикладене зовнішнє поле використовуючи гармонічну функцію у часі):

$$\ddot{z}_u + |\chi|\dot{z}_t = g + F(z)e^{i\omega t} \quad (3.5)$$

$F(z)$ - конфігураційна складова прикладеного зовнішнього поля

$$z = z_0 + z_1 \quad (3.6)$$

Загальний розв'язок (3.6) рівняння є сумою аналітичного розв'язку однорідного рівняння і одного з відомих часткових розв'язків

Аналітичний розв'язок однорідного рівняння знаходиться:

$$\ddot{z}_u + |\chi|\dot{z}_{0t} = 0, z_0(t) = Ce^{-|\chi|t} \quad (3.7)$$

Повний розв'язок рівняння знаходимо за функцією:

$$z(t) = C_1 e^{-|\chi|t} + C_2 e^{|\chi|t} \int e^{-|\chi|t} (g + F(z)e^{i\omega t}) dt \quad (3.8)$$

Розглянемо отримання розв'язоків з метою виділеної дійсної частини комплексних співвідношень:

$$z(t) = C_1 e^{-|\chi|t} + C_2 \left\{ \frac{g}{|\chi|} + F(z) \frac{e^{iwt}}{-|\chi| + iw} \right\} \quad (3.9)$$

$$C_2 \frac{g}{|\chi|} + C_1 e^{-|\chi|t} + C_2 F(z) \operatorname{Re} \left\{ \frac{e^{iwt}}{-|\chi| + iw} \right\} \quad (3.10)$$

$$\operatorname{Re} \frac{e^{iwt}}{-|\chi| + iw} = \operatorname{Re} \frac{(\cos wt + i \sin wt)}{(-|\chi| + iw)(-|\chi| - iw)} (-|\chi| - iw) \quad (3.11)$$

$$\operatorname{Re} \left\{ \frac{(\cos wt + i \sin wt)(-|\chi| - iw)}{|\chi|^2 + w^2} \right\} = -\frac{\cos wt + i \sin wt}{|\chi|^2 + w^2} = \frac{w \sin wt - |\chi| \cos wt}{|\chi|^2 + w^2} \quad (3.12)$$

Введемо позначення:

$$\sin \varphi = w \quad \cos \varphi = |\chi| \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{w}{|\chi|} \quad \varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{w}{|\chi|} \right) \quad (3.13)$$

В термінах введених позначень, отримані розв'язки приймають наступний вигляд 3.15, 3.16

$$\frac{\sin \varphi \cos wt - \cos \varphi \cos wt}{|\chi|^2 + w^2} = -\frac{\cos(\varphi + wt)}{|\chi|^2 + w^2} = -\frac{\cos(\operatorname{arctg} \frac{w}{|\chi|} + wt)}{|\chi|^2 + w^2} \quad (3.14)$$

$$z(t) = C_2 \frac{g}{|\chi|} + C_1 e^{-|\chi|t} - C_2 F(z) \frac{\cos(\operatorname{arctg} \frac{w}{|\chi|} + wt)}{|\chi|^2 + w^2} \quad (3.15)$$

Розв'язок 3.15 вказує наявність умов для формування левітуючого шару заряджених частинок у зовнішньому електричному полі: функція $F(z)$, а також фазова функція \arctg визначають просторову конфігурацію та топологію левітуючого шару заряджених частинок. Асимптотично ордината (висота левітуючого шару описує спрощеним співвідношенням 3.16:

$$z(t) \left(\lim_{t \rightarrow \infty} \rightarrow C_2 \frac{g}{|\chi|} - C_2 F(z) \right) \frac{\cos \omega t}{|\chi|^2 + \omega^2} \quad (3.16)$$

Одним з методів визначення властивостей та параметрів частинок полягає в тому, що левітація поляризованих частинок здійснюється зовнішнім електричним полем.

Необхідними умовами для левітації є наявність вертикальної сили, що компенсує силу тяжіння, та наявність горизонтальних сил. Коли положення рівноваги левітованої частинки стабільна, то частинка повертається в рівноважне положення після невеликого переходу від рівноваги, і ми можемо говорити про власне збудження частинки. Вимірювання частоти цих коливань забезпечує додаткову інформацію, яка може використовуватися для визначення параметрів системи. Зовнішнє однорідне електричне поле спричиняє поляризацію частинок, внаслідок чого левітована частинка та відштовхувальна частинка є джерелами неоднорідних електричних полів, обумовлених поляризацією [24].

Існує багато методів застосування левітації, один з таких методів являє собою визначення властивостей і параметрів частинок, яка полягає в тому, що левітація поляризованих часток здійснюється зовнішнім електричним полем. Розглянуто два випадки застосування:

- у першому випадку левітація часток у провідному приближенні обумовлена взаємодією дипольного моменту левітаційної частинки, індукованої зовнішнім гомогенним електричним полем, з градієнтом міцності електричного поля, яке вироблена іммобілізованою відбивною частинкою, яка також поляризована зовнішнім електричним полем. Поведінка сил, що діють на частинку, визначається різницею між

електродинамічними параметрами частинки і середовища приймача, а також різницею електродинамічних параметрів відгалужувальної сфери та середовища приймача.

- у другому випадку, левітація обумовлена самостійною дією частинки, за допомогою чого самодіяння залежить від характеру поляризації інтерфейсу між двома середовищами. Напрямок сили визначається різницею між електродинамічними параметрами середовища, де знаходиться частинка, та електродинамічними параметрами сусіднього середовища [25].

4 ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАНЬ ЗАПРОПОНОВАНОГО АЛГОРИТМУ

Електрофоретична провідність обумовлена дрейфом (спрямованим рухом) колоїдних частинок і частини іонів дифузійного шару і розрядженням їх на електродах. Прикладом колоїдних систем в електротехніці є:

- Емульсії (обидва компонента - рідини);
- Суспензії (тверді частинки в рідині);
- Аерозолі (тверді і рідкі частинки в газі).

Явище електрофорезу широко вивчається і знаходить велике практичне застосування. За допомогою електрофорезу проводиться поділ складних органічних і високомолекулярних речовин, наприклад, поділ та аналіз білків, плазми крові, електрофорез використовується в процесах електроосадження частинок з аерозолів, суспензій, емульсій.

З появою коронавіруса питання знезараження повітря стало актуальним не тільки для медичних установ. Сьогодні велика необхідність організувати знезараження в кожній квартирі і офісі. З урахуванням того, що техніка для знищення бактерій і вірусів ніколи не була предметом першої необхідності, багато хто просто не знають, які прилади можна використовувати для знезараження, в тому числі в присутності людей.

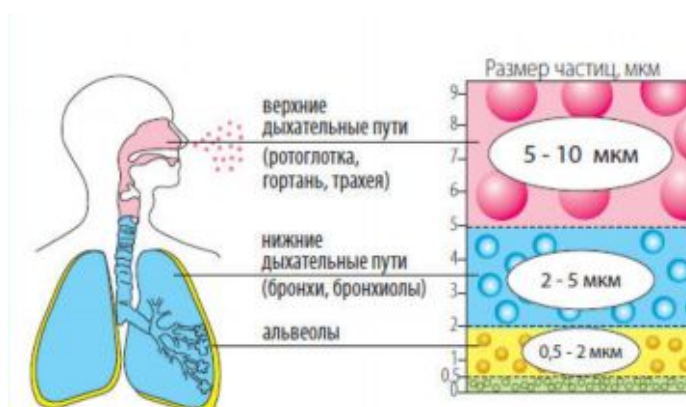


Рис.6 Розподіл частинок аерозолі в дихальних шляхах людини

Електрофорез у молекулярної біології

Вивчення електрокінетичних явищ (електроосмос, електрофорез, потенціал протікання, потенціал седиментації) представляє великий теоретичний і практичний інтерес. Використовуючи електрокінетичні явища можна вирішити ряд прикладних задач в різних галузях народного господарства.

Електрофорез - один з найважливіших методів в молекулярної біології, застосовуваний для аналітичного і препаративного поділу фрагментів ДНК або РНК в залежності від їх довжини. Метод заснований на різній рухливості молекул в агарозному або поліакриламідному гелі під дією електричного поля.

Явище електрофорезу широко вивчається і знаходить велике практичне застосування. За допомогою електрофорезу проводиться поділ складних органічних і високомолекулярних речовин, наприклад, поділ та аналіз білків, плазми крові, електрофорез використовується в процесах електроосадження частинок з аерозолів, суспензій, емульсій. Явища електрофорезу можуть знайти застосування в процесах буріння, цементаж і експлуатації свердловин. Зокрема, ці явища можуть бути використані для регулювання структурно-механічних властивостей глинистих розчинів, збагачення і поліпшення якості глин, зміцнення стінок свердловин, очищення нафтопродуктів від небажаних домішок, депарафінізації масляних фракцій і в багатьох інших випадках.

Методика вимірювання швидкості електрофорезу зводиться, або до безпосередньої реєстрації швидкості руху частинки в електричному полі під мікроскопом, або за швидкістю переміщення кордону золю з "бічний" рідиною в градуйованою U-образної трубки

Найбільш широке застосування електрофорез отримав для аналізу і очищення білків і нуклеїнових кислот, хоча цей метод може бути використаний і для інших заряджених біологічних молекул, таких як цукру, амінокислоти, пептиди, нуклеотиди. Метод дозволяє розділяти макромолекули, що розрізняються за такими параметрами, як розміри (або

молекулярна маса), просторова конфігурація, вторинна структура і електричний заряд, ці параметри можуть виступати як порізно, так і в сукупності. Принцип електрофоретичного розділення молекул складається в їх русі з різною швидкістю в постійному електричному полі

Для фракціонування білків, нуклеїнових кислот і їх фрагментів в даний час використовують майже виключно гель-електрофорез. Найбільш широко використовуються поліакриламідні гелі (ПААГ) і гелі агарози. Варіюючи концентрацію полімеру, можна отримувати гелі з дуже широким діапазоном розмірів пір.

Крім того, можна змінювати електричні заряди макромолекул шляхом варіації рН буфера, а їх конфігурацію - шляхом введення в буфер денатуруючих агентів або детергентів. Як інші «носіїв» рідкої фази широко використовують плівки з ацетату целюлози, фільтрувальну папір, тонкі шари силикагеля, целюлози, сефадексе і ін. В деяких випадках, наприклад для поділу низькомолекулярних речовин, ці системи мають свої переваги.

Знак і величина електричного заряду молекул, а значить, напрям і швидкість їх руху при електрофоретичному поділі залежать від значення рН і іонної сили середовища. Крім того, швидкість руху визначається молекулярною масою молекул іонним оточенням (складом і концентрацією буфера), прикладеним напругою і іншими факторами. У зв'язку з цим для отримання порівнянних даних електрофорез повинен здійснюватися при строго певних значеннях зазначених параметрів.

Для електрофорезу використовуються різні апарати - як ручні, так і напівавтоматичні. Сучасні комплекси оснащені мікропроцесорними блоками харчування і управляються комп'ютером; в більшості систем на останній стадії дослідження забарвлених мембран або гелевих пластинок (визначення відносної кількості білків в кожній фракції) використовується електронний кольоровий сканер або мініатюрна фотокамера, що істотно підвищує точність і відтворюваність результатів.

Програмне забезпечення дає можливість усередненого розрахунку оптичної щільності окремих фракцій шляхом автоматичного визначення меж «доріжок» і багаторазового сканування кожної з них в декількох «розрізах», що дозволяє виключити помилки через локальні мікродфектов і нерівного становища носія, а також до певної міри нівелювати викривлення доріжки і вплив пофарбованого фону при неповній відмиванні.

На екран дисплея і на принтер виводиться графік-денсітограма з розрахованим вмістом окремих білкових фракцій. При необхідності маркери меж фракцій на графіку можна скорегувати, при цьому буде проведений автоматичний перерахунок їх показників. У комп'ютері, як правило, створюється архів електрофореграм, їх можна в будь-який час отримати і переглянути.

Електрофоретична рухливість макромолекул

Електрофоретична рухливість - це швидкість руху частинки (зазвичай виражається в см/с) при напруженості електричного поля в 1 В/см. Ця величина має наступну розмірність: $\text{см}^2 \text{с}^{-1} \text{В}^{-1}$.

Розглянемо ізольовану частку, зважену в ідеальному діелектрику. Якщо прикласти рівномірне електричне поле, то на частку буде діяти сила, яка дорівнює добутку загального заряду частинки на напруженість цього поля. При накладенні електричного поля швидкість руху частинки (біологічної макромолекули) досить швидко збільшується до тих пір, поки електричну силу, діючу на частку з боку електричного поля, не врівноважує сила тертя. Після цього частка буде рухатися з постійною швидкістю. Рухливість макромолекул в поліакриламідному гелі обернено пропорційна середньому розміру пір (формула Фергюсона):

$$\lg U = \lg U_0 - KrT \quad (4.1)$$

де Kr - коефіцієнт затримки; U - рухливість макромолекул в гелі; U_0 - рухливість макромолекул у вільному розчині; T - щільність гелю (концентрація мономерів).

Електрофоретична рухливість кожного білка залежить одночасно і від його сумарного заряду, і від молекулярної маси, і від конфігурації, а також від жорсткості упаковки поліпептидного ланцюга. Внесок кожного з цих факторів невідомий і може істотно змінюватися в залежності від умов електрофорезу. Для встановлення суворої кількісної кореляції між будь-яким одним з перерахованих параметрів і електрофоретичної рухливістю білків треба виключити вплив усіх інших.

Одним з найбільш популярних методів є електрофорез в ПААГ з використанням додецилсульфату натрію (ДСН), який дозволяє фракціонувати білки в залежності від значення тільки одного параметра - їх молекулярної маси.

Основний принцип методу - зниження впливу заряду макромолекули на її електрофоретична рухливість. В цьому випадку повинна спостерігатися пропорційність між молекулярною масою макромолекули і її опором тертя (коефіцієнтом затримки). Для цього білки обробляють надлишком ДСН, який приблизно однаково зв'язується з переважною більшістю білків в співвідношенні 1,4 мг ДСН з 1 мг білка. Надлишок залишків сульфокислоти робить несуттєвим власний заряд білка, а сталість співвідношення детергент / білок робить практично однаковим ставлення негативного заряду до маси для будь-якого білка. Крім того, при обробці білка ДСН поліпептидний ланцюжок розпрямляється і набуває форму жорсткого еліпсоїда обертання, розмір великої осі обертання якого лінійно пов'язаний з числом амінокислотних залишків, а отже, з молекулярною масою білка.

Для спостереження за ходом електрофорезу в вихідний препарат вносять барвник, мігруючий в тому ж напрямку, що і фракціонуєміе білки. Швидкість просування барвника по гелю повинна бути більше, ніж у найбільш швидко мігруючого білка.

Електрофоретична рухливість жорсткого комплексу білок-ДСН прийнято виражати в значеннях величини R_f . Величина R_f дорівнює відношенню відстані, пройденого смугою макромолекули, від початку

робочого гелю до аналогічного відстані до смуги барвника в цьому гелі. Одночасно з фракціонування досліджуваної суміші необхідно провести електрофорез набору білків «маркерів», молекулярні маси яких точно відомі. Після закінчення фореа, вимірявши шляху міграції лідируючого барвника (бромфенолового синього) і кожного з маркерів, можна розрахувати значення R_f і, знаючи молекулярні маси маркерів, побудувати експериментальну залежність $\lg M_M$ від R_f . Якщо пористість гелю вибрана вдало, то така залежність буде лінійною. Після визначення значення R_f в досліджуваному білку з графіка можна знайти для цього білка величину $\lg M_M$ і розрахувати M_M . При даній пористості (концентрації) гелю описана вище лінійна залежність має місце тільки для білків, молекулярні маси яких лежать в певному інтервалі.

ВИСНОВКИ

В останні десятиріччя оптичне, мікрорідке, механічне, магнітне та електричне поля широко застосовуються в контролі мікро- / наночастинок, таких як уловлення, фокусування, характеристики, та розділення частинок. Точний контроль частинок, особливо клітин, вірусів, білків, ДНК молекул та інших біологічних частинок, має широкі перспективи застосування в біомедичній, біологія та інші галузі.

Електричні поля, як метод управління частинками, дуже придатні для маніпулювання біочастинками з перевагами сильної керованості, легкої експлуатації, висока ефективність та незначне пошкодження цілей. Два найважливіших електрокінетичних явищами є електрофорез (EP) та діелектрофорез (DEP). DEP - ідеальний контроль частинок метод для електрично нейтральних частинок. Коли діелектрична частинка підвішена в електричному полі, він буде поляризований на диполі, і між диполями та електрикою існуватиме кулонівська взаємодія поле. Якщо електричне поле неоднорідне, чиста сила буде діяти на частинку, щоб змусити частинку рухатися до / проти напрямку максимумів електричного поля.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Герасимов О.І. Технології захисту навколишнього середовища : підручник /Одеськ. держ. еколог. ун-т. Одеса: ТЕС, 2018. 300 с.
2. Kok J. F. A scaling theory for the size distribution of emitted dust aerosols suggests climate models underestimate the size of the global dust cycle //Proceedings of the National Academy of Sciences. 2011. Vol. 108. No. 3. P. 1016-1021.
3. Баранов В.Я., Фролов В.И. Электрокинетические явления. Учебное пособие. Москва.- М.: РГУ нефти и газа, 2002. 53 с
4. Що електрофорез і як це працює <https://www.greelane.com/uk/electrophoresis-definition-4136322/>
5. Евстапов А. А. Физические методы управления движением и разделением микрочастиц в жидких средах. I. Диэлектрофорез, фотофорез, оптофорез, оптический пинцет //Научное приборостроение. 2005. Vol. 15. No. 1.
6. Tajik P. et al. Simple, cost-effective, and continuous 3D dielectrophoretic microchip for concentration and separation of bioparticles //Industrial & Engineering Chemistry Research. 2019. Vol. 59. No. 9. P. 3772-3783.
7. Aliotta F., Gerasymov O.I., Calandra P. Electrospray Jet Emission: An Alternative Interpretation Invoking Dielectrophoretic Forces. //Ch.3 (pp.51-90) in Book “Intelligent Nanomaterials”, 2nd edition. (Ed. A. Tiwari, Y.K. Mishra, H. Kobayashi, A. P.F. Turner). Advanced Materials Series. – John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, and Scrivener Publishing LLC, Beverly, Massachusetts, USA, 2017. – 581p.
8. Pethig R., Markx G. H. Applications of dielectrophoresis in biotechnology //Trends in biotechnology. 1997. Vol. 15. No 10. P. 426-432.
9. Buyong M. R. et al. Dielectrophoresis manipulation: Versatile lateral and vertical mechanisms //Biosensors. 2019.Vol. 9. No. 1. P. 30.

10. Aliotta F., Gerasymov O.I., Calandra P. Electrospray Jet Emission: An Alternative Interpretation Invoking Dielectrophoretic Forces. //Ch.3 (pp.51-90) in Book “Intelligent Nanomaterials”, 2nd edition. (Ed. A. Tiwari, Y.K. Mishra, H. Kobayashi, A. P.F. Turner). Advanced Materials Series. – John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, and Scrivener Publishing LLC, Beverly, Massachusetts, USA, 2017. – 581p.
11. Jones R. B. Stability of colloidal clusters in shear flow near a wall: Stokesian dynamics simulation studies //The Journal of Chemical Physics. – 2001. Vol. 115. No. 11. P. 5319-5330.
12. Greenwood P. A., Greenway G. M. Sample manipulation in micro total analytical systems //TRAC Trends in Analytical Chemistry. 2002. Vol. 21. No. 11. P. 726-740.
13. Hölzel R. Single particle characterization and manipulation by opposite field dielectrophoresis //Journal of Electrostatics. 2002. Vol. 56. No. 4. P. 435-447.
14. Dürr M. et al. Microdevices for manipulation and accumulation of micro-and nanoparticles by dielectrophoresis //Electrophoresis. 2003. Vol. 24. No. 4. P. 722-731.
15. Li Y., Kaler K. V. I. S. Dielectrophoretic fluidic cell fractionation system //Analytica Chimica Acta. 2004. Vol. 507. No. 1. P. 151-161.
16. Pohl H. A. Dielectrophoresis //The behavior of neutral matter in nonuniform electric fields. 1978
17. Jones T. B., Nenadic N. G. Electromechanics and MEMS. – Cambridge University Press, 2013.
18. Cheng J. et al. Isolation of cultured cervical carcinoma cells mixed with peripheral blood cells on a bioelectronic chip //Analytical chemistry. 1998. Vol. 70. No. 11. P. 2321-2326.
19. Мартыненко Ю. Г. О проблемах левитации тел в силовых полях //Соросовский образовательный журнал. 1996. №. 3. С. 82-86.

20. Senshu H. et al. Photoelectric dust levitation around airless bodies revised using realistic photoelectron velocity distributions //Planetary and Space Science. 2015. Vol.116. P.18-29.
21. Dolinsky Y., Elperin T. Levitation and oscillations of neutral particles in a constant electric field //Journal of Applied Physics. 2011. Vol.. 109. No. 11. P. 114902.
22. Акулов В. А. Физико-математические аспекты моделирования пониженных уровней гравитации //Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. 2007. №. 2 (15)
23. Сирова Г. О. и др. Одержання, очистка та властивості колоїдних розчинів. Коагуляція колоїдних розчинів. Колоїдний захист. – 2017.
24. Мартыненко Ю. Г. Движение твердого тела в электрических и магнитных полях. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 86 с.
25. Мартыненко Ю. Г. О проблемах левитации тел в силовых полях //Соросовский образовательный журнал. 1996. №. 3. 82-86 с.