

КАБІНЕТ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

НАЗАРЕНКО ІГОР ПЕТРОВИЧ

УДК 66.086.2

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС ОЧИЩЕННЯ
ТА СЕПАРАЦІЇ СЛАБОПРОВІДНИХ СУСПЕНЗІЙ
В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Кабінету Міністрів України та Таврійському державному агротехнологічному університеті Міністерства аграрної політики та продовольства України

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Червінський Леонід Степанович,
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
професор кафедри електроприводу і електротехнологій
ім. проф. С. П. Бондаренка

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Черенков Олександр Данилович,
Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка,
професор кафедри технотроніки і теоретичної електротехніки

доктор технічних наук, професор
Дубовенко Костянтин Вікторович,
Миколаївський національний аграрний університет,
завідувач кафедри електротехнологій і електропостачання

доктор технічних наук, професор
Василів Карл Миколайович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри електричних станцій

Захист відбудеться «__» _____ 2015 року о __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 в Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ-41, вул. Генерала Родімцева, 19, навчальний корпус № 1, кімната 97

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ-41, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розісланий «__» _____ 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Очищення та сепарація рідин є складовими частинами багатьох технологій як промислового, так і сільськогосподарського виробництва та переробки сільськогосподарської продукції.

Рішення народно-господарської задачі підвищення ефективності очищення та сепарації рідких продуктів агропромислового виробництва передбачає пошук нових та вдосконалення існуючих методів і технічних засобів очищення та сепарації слабопровідних суспензій. До таких рідин відносяться рослинні олії, тваринні жири та їхні розчини, моторні мастила, вуглеводневі палива, біопалива рослинного походження, трансформаторна олива та ін. Всі ці продукти являють собою складні гетерогенні системи на основі слабопровідних рідин. Очищення нафтопродуктів спрямоване на видалення супутніх речовин, які знижують експлуатаційні показники технічних рідин, мастил та палив. З рослинних олій видаляють як харчові компоненти, які на етапі збереження окислюються та сприяють помутнінню, додаткові присмаки та запахи, що знижують споживчі властивості продукту, так і нехарчові домішки. Багато природних речовин, що потребують видалення з рідких продуктів, мають самостійну цінність та можуть використовуватись в хімічній, харчовій, електротехнічній та інших галузях промисловості. В рідкому продукті таких речовин може бути декілька, тому процес видалення часто потребує одночасного розділення компонентів.

Основними технічними засобами видалення домішок з рідин є механічні сепаратори, що працюють за принципом центрифугування, та фільтри. Ці пристрої поряд з перевагами, які полягають у досвіді застосування та якості очищення, мають великі енерго- та ресурсовитрати, що у десятки разів вищі порівняно з електроочищувачами та електросепараторами. Тому, одним із шляхів підвищення ефективного очищення та сепарації рідких продуктів є застосування електрофізичних методів розділення дисперсних систем, які можуть застосовуватись як окремо, так і в сукупності з іншими.

В основу електросепарації покладено осідання зважених частинок на електроди під дією електричного поля. Цей метод має найбільшу ефективність для очищення неполярних рідин, діелектричні властивості яких дозволяють подавати високу напругу на електроди. При цьому не змінюється хімічний стан речовин, оскільки електрохімічні реакції в неполярних речовинах практично не відбуваються.

Попередні теоретичні та експериментальні дослідження показали, що біжуче електричне поле, створене багатофазною системою електродів, дозволяє суттєво розширити спектр застосування електричних засобів очищення та сепарації слабопровідних суспензій завдяки додатковій силі, що діє на частинки в біжучому полі. Ця сила рухає частинки вздовж рядів електродів і дозволяє не тільки транспортувати їх в зони вивантаження при очищенні рідин в пристроях неперервної дії, а й розділяти їх за ознаками електрофізичних властивостей при використанні двох полів різної частоти, біжучих зустрічно в сепараторах.

Використання обертового електричного поля дає змогу визначити електрофізичні властивості частинок дисперсної фази суспензії без їх вилучення з рідини.

Складність застосування пристроїв очищення та сепарації слабопровідних суспензій в електричному полі зумовлена нестабільністю електрофізичних властивостей як дисперсної фази, так і дисперсійного середовища суспензій, непередбаченістю процесу накопичення домішок на електродах, що призводить до зриву процесу, та ін.

Вище зазначене підтверджує актуальність дисертаційної роботи, яка спрямована на вирішення науково-прикладної проблеми – розробки науково-технічних основ створення і застосування електротехнологічних комплексів очищення та сепарації слабопровідних суспензій в змінному електричному полі високої напруженості, які ґрунтуються на закономірностях взаємодії електричного поля, створеного багатозональними електродними системами, з дисперсними частинками суспензії, що дозволить забезпечити високоефективне очищення та сепарацію слабопровідних суспензій за ознаками електрофізичних властивостей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконувались у Національному університеті біоресурсів і природокористування України та у Таврійському державному агротехнологічному університеті.

Тема дисертаційної роботи пов'язана з планами НДР і ДКР Таврійської державної агротехнічної академії за програмою №1 на 2001–2006 роки «Розробка наукових основ систем технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України» (підпрограма 1.11 «Розробка і удосконалення технологій та технологічних засобів з використанням променистої енергії та силових полів електричної природи», тема 1.11.3 «Розробка електротехнологічних методів і засобів очищення рідких сільськогосподарських продуктів», номер державної реєстрації 0102U000685), Таврійського державного агротехнологічного університету за програмою №1 на 2007–2010 роки "Розробка наукових основ систем технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України" (підпрограма 1.11 «Розробка нових і удосконалення існуючих технологій та технічних засобів з використанням силових полів електричної природи» тема 1.11.1 «Теоретичне та експериментальне обґрунтування кінетики процесів і параметрів електротехнологічних пристроїв очищення рослинних олій», номер державної реєстрації 0107U008958), Таврійського державного агротехнологічного університету за програмою №1 на 2011–2015 роки «Розробка наукових основ систем технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Південного регіону України» (підпрограма 1.16 «Розробка технологій створення і використання експериментальних зразків для виробництва та переробки рицини на енергетичну біосировину та раціональне використання продуктів її конверсії» тема 1.16.4 Розробка технологій і технічних засобів очищення та утилізації робочих і харчових рідин силовими полями», номер державної реєстрації 0111U001950).

Мета і задачі дослідження. Розробка науково-технічних основ для створення електротехнологічних комплексів очищення та сепарації слабопровідних суспензій в змінному електричному полі високої напруженості, що забезпечує їх високоефективне очищення та сепарацію за ознаками електрофізичних властивостей.

Досягнення мети потребує вирішення таких задач:

- провести аналіз існуючих методів очищення і сепарації слабопровідних суспензій та визначити найбільш перспективні за якістю, енергоємністю та експлуатаційними витратами;

- теоретично дослідити процеси взаємодії електричного поля із слабопровідними суспензіями та визначити пріоритетність сил, що діють на дисперсну фазу з позицій застосування їх у пристроях очищення і сепарації, та вплив електрофізичних характеристик суспензії і частоти поля на ці сили;

- розробити та дослідити математичні моделі електричного поля та поля сил і моментів для багатофазних електродних систем;

- теоретично обґрунтувати, розробити і дослідити методи визначення електрофізичних властивостей слабопровідних суспензій;

- теоретично обґрунтувати геометричні параметри багатоелектродних систем пристроїв очищення та сепарації слабопровідних суспензій;

- розробити і дослідити математичні моделі процесу очищення та сепарації слабопровідних суспензій;

- експериментально дослідити процеси очищення та сепарації слабопровідних суспензій в електричному полі, а також дослідити енергетичні показники багатоелектродних систем;

- розробити та дослідити технічні засоби електротехнологічного комплексу очищення та сепарації слабопровідних суспензій в електричному полі.

Об'єкт дослідження. Процеси очищення і сепарації слабопровідних суспензій в змінному електричному полі.

Предмет дослідження. Закономірності процесу взаємодії електричного поля багатофазних електродних систем з частинками слабопровідних суспензій.

Методи дослідження. Для розв'язання задач, поставлених у роботі, застосовувались методи електродинаміки суцільних середовищ, теорії поля, гідродинаміки та математичної фізики. Для аналітичного опису електричного поля і поля сил та моментів багатоелектродних областей використана теорія функції комплексної змінної та конформних відображень. Для дослідження динаміки руху дисперсної фази суспензій використані методи розв'язання диференціальних рівнянь. Експериментальні дослідження в лабораторних умовах проводилися на спеціально розроблених установках та джерелах багатофазної високої напруги регульованої частоти, а також промислового електротехнічного обладнання та засобів вимірювання. Для вимірювання електрофізичних характеристик слабопровідних суспензій застосовувались стандартні і розроблені методики.

Для розрахунків, візуалізації полів і побудови графічних залежностей використовувався пакет прикладних програм для ПЕОМ «MATLAB» та «ELCUT».

Наукова новизна одержаних результатів:

- отримали подальший розвиток теоретичні положення щодо процесу взаємодії електричного поля з поляризованими частинками суспензії для багатофазних систем електродів, що дозволило започаткувати новий напрям – використання біжучого електричного поля в пристроях очищення та сепарації слабопровідних суспензій, яке, на відміну від існуючих, дозволяє здійснювати упорядкований рух частинок уздовж електродів і маніпулювати частинками з різними властивостями;

- вперше математично інтерпретована залежність сили, яка діє на поляризовану частинку в електричному полі, від частоти та електрофізичних властивостей суспензії, що дозволяє обґрунтовано вибирати частоти електричних полів технічних засобів очищення та сепарації, які відповідають максимальним величинам сил та моментів;

- вперше отримано теоретичну формулу для розрахунку сили, яка діє на поляризовану частинку в електричному полі, через функцію комплексного потенціалу та на її підставі розроблено аналітичну модель поля сил у системі багатофазних дворядних плоских електродів, що дозволило, на відміну від чисельних методів, теоретично дослідити процеси очищення та сепарації суспензії;

- вперше отримано теоретичну формулу для розрахунку моменту сили, що діє на поляризовану частинку в електричному полі, через функцію комплексного потенціалу та на її підставі розроблено аналітичну модель поля моментів сил в системі багатофазних електродів у вигляді гіперболічних циліндрів, що стало передумовою і теоретичною основою обґрунтування методів та розробки технічних засобів визначення електрофізичних властивостей слабопровідних суспензій;

- отримали подальший розвиток теоретичні положення щодо взаємодії обертового електричного поля з поляризованою частинкою суспензії та вперше отримано формули, на основі яких розроблено методи й технічні засоби, що, на відміну від існуючих, дозволили визначити електрофізичні властивості дисперсної фази без її вилучення із середовища за результатами непрямих сукупних вимірювань;

- вперше теоретично встановлено залежності середньої сили, яка діє на поляризовану частинку, від співвідношення розмірів міжелектродної області, що дозволило обґрунтувати геометричні параметри електродних систем, які забезпечують максимальну середню силу, що діє на частинку дисперсної фази суспензії, та відповідно максимальний ступінь очищення і коефіцієнт розділення при сепарації;

- отримали подальший розвиток теоретичні положення стосовно динаміки частинок в електричному полі для багатофазних систем електродів, що дало змогу на підставі рівняння руху частинки теоретично встановити вплив параметрів поля та суспензії на ефективність процесів очищення та сепарації;

- вперше встановлено залежності геометричного коефіцієнта та коефіцієнта енерговитрат трифазних та чотирифазних багаторядних систем циліндричних електродів від їх геометричних параметрів, що дозволило визначити енергетично вигідніші співвідношення розмірів міжелектродної області пристроїв очищення та сепарації.

Практичне значення одержаних результатів. На основі досліджень розроблено електротехнологічний комплекс очищення і сепарації слабопровідних суспензій, до якого належить ПЕОМ, блок посилення, трансформаторний і технологічний блок та вимірювальний пристрій. Розроблені математичні моделі, обґрунтовані параметри процесу очищення та сепарації (частота електричного поля та час), обґрунтовані конструктивні параметри (розміри електродів і схема подачі напруги) дають практичну можливість використання електричного поля багатofазних систем електродів у технологіях очищення як рідких продуктів сільськогосподарського виробництва, так і нафтопродуктів, а також для розділення матеріалів, що відрізняються за електрофізичними властивостями та знаходяться в дисперсному стані.

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Таврійського державного агротехнологічного університету.

Впровадження розроблених технічних засобів та електротехнологічного комплексу в цілому в сільськогосподарське виробництво та промисловість дозволить отримати малоенергоємну та екологічно чисту технологію, що забезпечить якісне очищення рідин, можливість розділення, вилучення та використання речовин, які були в дисперсному стані, для потреб харчової, хімічної, електротехнічної та інших галузей народного господарства. Отримані результати можуть використовуватися в медицині і біології для дослідження біологічних структур, що знаходяться в дисперсному стані у вигляді суспензій або емульсій.

Розроблене обладнання електротехнологічного комплексу дає можливість не тільки здійснювати якісне очищення та сепарацію суспензій, але й проводити експрес-контроль якості продуктів у вигляді слабопровідних суспензій. В електротехнологічному комплексі, як для технологічних цілей, так і для контролю використовується одне джерело живлення з ПЕОМ, яка виконує функції багатofазного генератора регульованої частоти, і пристрою візуалізації стану дисперсної фази під час контролю якості та забезпечує розрахунок електрофізичних параметрів суспензії, що підлягає контролю.

Розроблений електротехнологічний комплекс пройшов виробничу перевірку в ТОВ НВП «ТОРН» Якимівського району Запорізької області, СВК «Мирний» Токмацького району Запорізької області, СПГ «Урожай» Братського району Миколаївської області.

Результати впровадження підтвердили ефективність застосування електротехнологічного комплексу для очищення та сепарації соняшникової олії в електричному полі: забезпечено ступінь очищення від нежирових домішок на рівні 98%.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які відображають суть

дисертаційної роботи, отримано автором самостійно. Постановку завдань і аналіз результатів виконано спільно з науковим консультантом доктором технічних наук, професором Л. С. Червінським.

Особистий внесок здобувача такий: досліджено процес очищення і дезодорації рідин в ультразвуковому та постійному електричному полях [1–4, 6–8, 9, 12, 13]; досліджено процес очищення і сепарації слабопровідних суспензій в електричному полі, що створюється багатофазними системами електродів [10, 13, 15, 18–23, 32]; теоретично досліджено процес взаємодії електричного поля зі слабопровідними суспензіями [5, 20, 27]; розроблено та досліджено математичні моделі електричного поля і поля сил та моментів для багатофазних електродних систем [14, 16, 30, 33]; теоретично обґрунтовано, розроблено та досліджено методи визначення електрофізичних властивостей слабопровідних суспензій [20, 24, 25, 31]; теоретично обґрунтовано геометричні параметри багатоелектродних систем пристроїв очищення і сепарації слабопровідних суспензій [28, 29]; розроблено та досліджено математичні моделі процесу очищення та сепарації слабопровідних суспензій [21, 32]; досліджено енергетичні показники багатоелектродних систем [11, 29]; розроблено та досліджено технічні засоби електротехнологічного комплексу очищення та сепарації слабопровідних суспензій в електричному полі [17, 19, 20, 26].

Дослідження проводились в наукових лабораторіях Таврійського державного агротехнологічного університету та Національного університету біоресурсів і природокористування України та у виробничих умовах аграрних господарств Запорізької та Миколаївської областей.

Апробація результатів досліджень. Матеріали досліджень представлені, обговорені і схвалені на щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу і аспірантів Національного університету біоресурсів і природокористування України (м. Київ, 2008–2010 р.), Таврійського державного агротехнологічного університету (м. Мелітополь, 2000–2013 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Землеробська механіка на рубежі сторіч» (м. Мелітополь, 2001 р.); регіональній науково-технічній конференції «Енергетика в АПК» (м. Мелітополь, 2007 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми електроенергетики і автоматики АПК» (м. Київ, 2008 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Енергозабезпечення технологічних процесів АПК» (м. Мелітополь, 2008 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Новітні електрифіковані технології» (м. Київ, 2009 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК» (м. Харків, 2009 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Ресурсозбереження і використання відновлювальних джерел енергії – пріоритетний напрям розвитку АПК» (м. Дубляни, 2009 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Моделювання технологічних процесів в АПК» (м. Мелітополь, 2010 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК півдня України» (м. Мелітополь, 2011 р.); міжнародній науково-виробничій конференції «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии и

информационных технологий» (м. Белгород, 2012 р.); міжнародній науково-виробничій конференції «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве» (м. Мінськ, 2013 р.)

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 33 друковані праці, у яких викладено основний зміст виконаних досліджень, зокрема 17 статей – у фахових виданнях, 5 статей – у міжнародних виданнях та у фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, 6 статей – в інших виданнях України, 4 тези доповідей та 1 патент України.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 207 найменувань та додатків. Повний обсяг дисертації становить 382 сторінки, у тому числі 260 сторінок основного тексту, 115 рисунків, 16 таблиць і 20 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ТА СЕПАРАЦІЇ СЛАБОПРОВІДНИХ СУСПЕНЗІЙ» розглянуто сучасні методи очищення і сепарації рідин, проаналізовано особливості електродних систем апаратів очищення в електричному полі, розглянуто джерела живлення для пристроїв очищення та методи визначення електрофізичних властивостей суспензій.

Для очищення та сепарації слабопровідних суспензій з існуючих сучасних методів найбільш широкое застосування знайшли гравітаційне відстоювання, центрифугування, фільтрація та методи, що ґрунтуються на використанні електричного поля.

Як показав аналіз, ці методи мають суттєві недоліки, а саме: велику енергоємність для центрифугування та фільтрації; низькі якісні показники для гравітаційного відстоювання; вибірковість застосування залежно від густини рідини та частинок для центрифугування і гравітаційного відстоювання та залежність від електрофізичних властивостей рідини і домішок для електричних методів; можливість розділення зважених частинок тільки за ознакою густини і розміру для гравітаційного відстоювання, центрифугування та фільтрації.

Визначено, що розвиток систем очищення і сепарації спрямований на удосконалення існуючих або розробку нових методів та технічних засобів для зменшення енерго- та ресурсовитрат на процес, підвищення технологічності, забезпечення екологічної чистоти та можливості розділення цінних компонентів, що вилучаються із суспензії для їх використання.

Електричне очищення та сепарація рідин належать до методів розділення дисперсних систем. Вплив сильних електричних полів на дисперсні системи досліджено в роботах І. І. Мартиненка, Г. Б. Іноземцева, Л. С. Червінського, О. М. Береки (Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ). В області очищення та сепарації дисперсних систем з повітряним середовищем значні результати досягнуті в очищенні димових газів, розділенні сипких матеріалів та при збагаченні корисних копалин. Великий

внесок у теорію і практику розділення дисперсних систем в електричному полі зробили вчені: І. Ф. Бородін, В. І. Тарушкін (Московський державний агроінженерний університет ім. Горячина, м. Москва), А. М. Басов, Ф. Я. Ізаков (Челябінський державний агроінженерний університет, м. Челябінськ). Більшість робіт були спрямовані на розділення дисперсних систем у полі коронного розряду та у неоднорідному полі діелектричних сепараторів. Роботи цих наукових шкіл показали, що електричне поле дозволяє розділяти дисперсні системи за ознаками їх електрофізичних властивостей.

Досвід розробки електричних очищувачів рідин, таких як палива й інші нафтопродукти, збагачено школою Національного авіаційного університету (м. Київ) під керівництвом Г. А. Нікітіна.

Теоретичні та експериментальні дослідження у напрямі очищення рідин в електричному полі, які проводились останніми роками М. К. Бологою та І. І. Бериллом в Інституті прикладної фізики Академії наук Молдови, М. А. Поповим в Чуваській державній сільськогосподарській академії, М. М. Українцевим в Азово-Чорноморській державній агроінженерній академії, показали можливість очищення рослинних олій у постійному електричному полі та полі коронного розряду.

Перевагою електричних методів очищення та сепарації слабопровідних суспензій є мала енергоємність у зв'язку з малою електропровідністю рідини; можливість маніпулювання частинками за рахунок зміни параметрів електричного поля; вибірковість дії електричного поля на частинки з різними електрофізичними властивостями; малий гідравлічний опір пристроїв; екологічність; відсутність рухомих вузлів та змінних елементів.

Загальними недоліками існуючих електричних методів і технічних засобів очищення і сепарації слабопровідних суспензій в електричному полі є нестабільність процесу на постійному струмі, потреба в періодичному розвантаженні (накопичених на електродах, концентраторах або в чарунках-накопичувачах) частинок. Створення таких умов роботи пристроїв очищення та сепарації, в яких електричне поле забезпечує задану ефективну траєкторію руху частинок, дозволило б позбутись цих недоліків.

Дотепер не приділялась увага дослідженню процесів очищення та сепарації в електродних системах з багатофазною напругою, які здатні створювати, окрім пульсуючого, біжуче та обертове електричні поля. Тому, нерозв'язаною залишається задача дослідження закономірностей поведінки частинок слабопровідної суспензії в змінному електричному полі, створеному як однофазними (пульсуюче поле), так і багатофазними системами електродів (пульсуюче, біжуче та обертове електричні поля). Не досліджено вплив частоти та структури поля на процеси взаємодії поля і частинки.

Застосування в пристроях очищення та сепарації біжучого електричного поля, має суттєві переваги порівняно з постійним та пульсуючим полями: 1) можливість транспортування частинок домішок вздовж електродів без осідання на них, що сприятиме створенню пристроїв, працюючих в неперервному режимі; 2) можливість вилучати частинки домішок, які не мають заряду, тобто суттєво

розширюється область застосування пристроїв електричного очищення;
3) можливість розділяти частинки за ознаками електрофізичних властивостей за використання двох полів різної частоти, біжучих зустрічно при сепарації;
4) використання обертового електричного поля дає змогу визначати електрофізичні властивості частинок дисперсної фази суспензії без їх вилучення з рідини, що дозволяє уникнути похибок, пов'язаних зі зміною електрофізичних властивостей після вилучення та скоротити час вимірювання.

Аналіз наведених у розділі результатів наукових досліджень дозволив зробити такі висновки для подальшої роботи.

1. Аналіз сучасних методів та технічних засобів очищення і сепарації слабопровідних суспензій показав, що використання електричних методів є одним з пріоритетних напрямів розвитку технологій очищення та сепарації завдяки їх малій енергоємності, малому гідравлічному опору, екологічності, відсутності рухомих вузлів та змінних елементів за високої якості очищення та низьких експлуатаційних витрат.

2. Існуючі методи та пристрої очищення недосконалі, оскільки побудовані на осіданні зважених частинок на електроди в постійному електричному полі і тому мають недоліки, які обмежують їх застосування. Усунення цих недоліків можливе шляхом створення таких умов роботи пристроїв, в яких змінне електричне поле забезпечувало б рух частинок за заданою траєкторією вздовж системи електродів.

3. Рух частинок та процеси очищення і сепарації в електричному полі, створеному багатофазними системами електродів досліджено недостатньо. Виявлення закономірностей процесу в таких системах на основі створення математичних моделей електричного поля, поля діючих сил і динаміки руху частинок дозволить обґрунтувати геометричні параметри електродних систем і параметри систем напруг, які забезпечать ефективні траєкторії руху частинок у визначені зони та розділення частинок за ознаками електрофізичних властивостей.

4. Сучасні джерела живлення для пристроїв електричного очищення не відповідають вимогам до джерел живлення багатофазних систем електродів, які мають забезпечити високу багатофазну напругу регульованої частоти та амплітуди.

5. Визначення електрофізичних властивостей частинок суспензії відомими методами потребує їх вилучення з рідини, що призводить до додаткових похибок та ускладнює вимірювання. Для обґрунтування і вибору параметрів електричного поля, які забезпечують ефективне очищення та сепарацію суспензії, необхідно розробити метод визначення властивостей середовища і частинок без їх вилучення із середовища на основі створення математичних моделей обертового електричного поля та поля моментів сил багатофазних систем електродів у вигляді гіперболічних циліндрів.

6. Оцінка сучасних методів та технічних засобів очищення та сепарації слабопровідних суспензій показала, що існує необхідність розробки нового енерго- і ресурсозберігаючого методу та відповідного комплексу обладнання.

У другому розділі «ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ОЧИЩЕННЯ І СЕПАРАЦІЇ СЛАБОПРОВІДНИХ СУСПЕНЗІЙ» досліджено сили і моменти сил, які діють на поляризовану частинку у вигляді кулі в електричному полі багатозональних систем електродів:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F} &= Re \left(\dot{A} \left(\bar{E}_x \frac{\partial \dot{\vec{E}}}{\partial x} + \bar{E}_y \frac{\partial \dot{\vec{E}}}{\partial y} + \bar{E}_z \frac{\partial \dot{\vec{E}}}{\partial z} \right) \right); \\ \vec{M} &= Re \left(\dot{A} \cdot \dot{\vec{E}} \times \bar{\vec{E}} \right); \\ \dot{A} &= 4\pi\epsilon_c a^3 \frac{\epsilon_v - i \frac{\sigma_v}{\omega} - \epsilon_c + i \frac{\sigma_c}{\omega}}{\epsilon_v - i \frac{\sigma_v}{\omega} + 2\epsilon_c - i 2 \frac{\sigma_c}{\omega}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де \vec{F} – сила, що діє на частинку, Н;

\dot{A} – комплексний параметр, що характеризує діелектричні властивості

частинки, Н·м³/В²;

$\dot{\vec{E}}$ – комплекс вектору напруженості електричного поля, В/м;

$\bar{\vec{E}}$ – вектор, комплексно спряжений з вектором $\dot{\vec{E}}$, В/м;

\vec{M} – момент сили, що діє на частинку, Н·м;

ϵ_c, ϵ_v – діелектрична проникність речовин середовища та частинки відповідно, Ф/м;

σ_c, σ_v – питома електропровідність речовин середовища та частинки відповідно, См/м;

a – радіус частинки, м;

ω – кутова частота, рад/с.

В пульсуючому електричному полі сила буде пропорційна дійсній частині комплексного параметру \dot{A} – $Re(\dot{A})$:

$$Re(\dot{A}) = 4\pi\epsilon_c a^3 \frac{(\epsilon_v - \epsilon_c)(\epsilon_v + 2\epsilon_c) + \left(\frac{\sigma_v}{\omega} - \frac{\sigma_c}{\omega}\right)\left(\frac{\sigma_v}{\omega} + 2\frac{\sigma_c}{\omega}\right)}{(\epsilon_v + 2\epsilon_c)^2 + \left(\frac{\sigma_v}{\omega} + 2\frac{\sigma_c}{\omega}\right)^2}. \quad (2)$$

У біжучому полі до цієї сили додається сила, яка пропорційна уявній частині $\dot{A} - Im(\dot{A})$, а в обертовому – момент сили пропорційний $Im(\dot{A})$:

$$Im(\dot{A}) = 4\pi\varepsilon_c\alpha^3 \frac{(\varepsilon_u - \varepsilon_c) \left(\frac{\sigma_u}{\omega} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega} \right) - (\varepsilon_u + 2\varepsilon_c) \left(\frac{\sigma_u}{\omega} - \frac{\sigma_c}{\omega} \right)}{(\varepsilon_u + 2\varepsilon_c)^2 + \left(\frac{\sigma_u}{\omega} + 2 \frac{\sigma_c}{\omega} \right)^2}. \quad (3)$$

Як впливає з системи формул (1), сила і момент залежать не тільки від електрофізичних властивостей частинки та середовища, а й від кутової частоти. Характери залежностей $Re(\dot{A}) = f(\omega)$ та $Im(\dot{A}) = f(\omega)$ для усіх можливих варіантів співвідношень між $\varepsilon_c, \varepsilon_u, \sigma_c, \sigma_u$ (рис. 1) показують: модуль дійсної частини в більшості випадків монотонно зменшується і тільки в одному випадку зростає, що зумовлює використання постійного струму в пристроях електричного очищення та сепарації суспензій; модуль уявної частини у всіх випадках має один максимум, що потребує визначення частоти поля, яка відповідає цьому максимуму при використанні в пристроях очищення та сепарації біжучого електричного поля. Максимальна величина дипольного моменту для пульсуючого та біжучого полів має однаковий порядок (максимальна величина дробу формули (2) дорівнює 1 та 0,75 – дробу формули (3)).

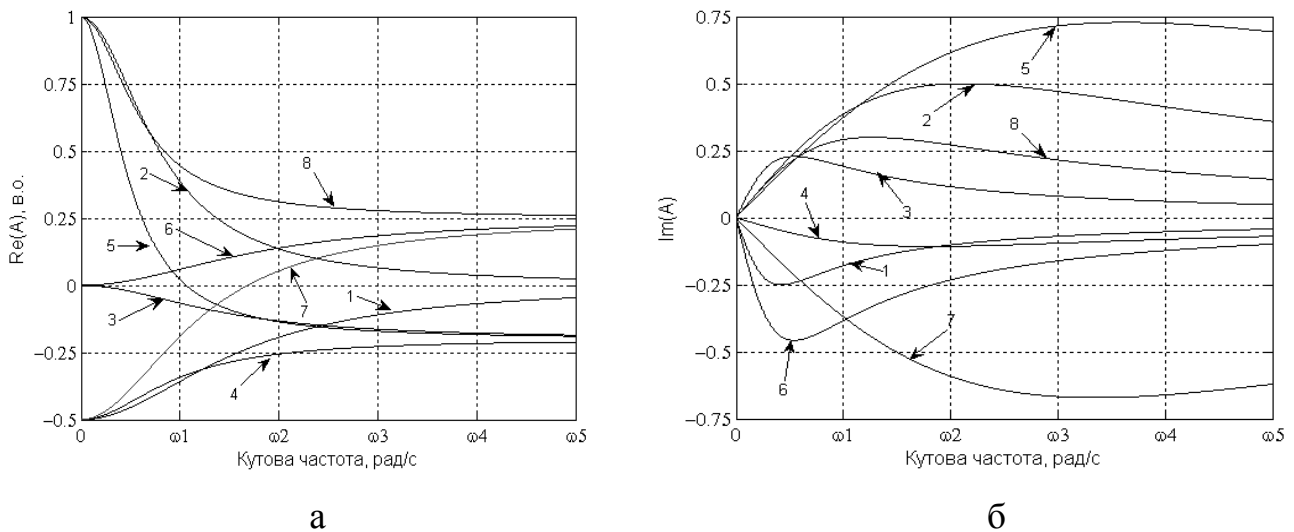


Рис. 1. Залежність дійсної частини (а) та уявної (б) складової комплексного параметру \dot{A} від кутової частоти ω : 1 – $\varepsilon_u = \varepsilon_c = 0, \sigma_u = \sigma_c < 0$; 2 – $\varepsilon_u = \varepsilon_c = 0, \sigma_u - \sigma_c > 0$; 3 – $\varepsilon_u - \varepsilon_c < 0, \sigma_u - \sigma_c = 0$; 4 – $\varepsilon_u - \varepsilon_c < 0, \sigma_u - \sigma_c < 0$; 5 – $\varepsilon_u - \varepsilon_c < 0, \sigma_u - \sigma_c > 0$; 6 – $\varepsilon_u - \varepsilon_c > 0, \sigma_u - \sigma_c = 0$; 7 – $\varepsilon_u - \varepsilon_c > 0, \sigma_u - \sigma_c < 0$; 8 – $\varepsilon_u - \varepsilon_c > 0, \sigma_u = \sigma_c > 0$

Оскільки величина сили та моменту, відповідно формулам (1)...(3), залежить від напруженості поля та його конфігурації, то для обґрунтування геометричних параметрів систем електродів та параметрів систем напруг пристроїв очищення та сепарації, дослідження динаміки частинок в таких пристроях потрібно аналітично описати електричне поле багатозначних систем електродів, що створюють

пульсуючі та біжучі електричні поля. Такі системи можна реалізувати через ряди пластинчастих плоских електродів, як показано на рис. 2.

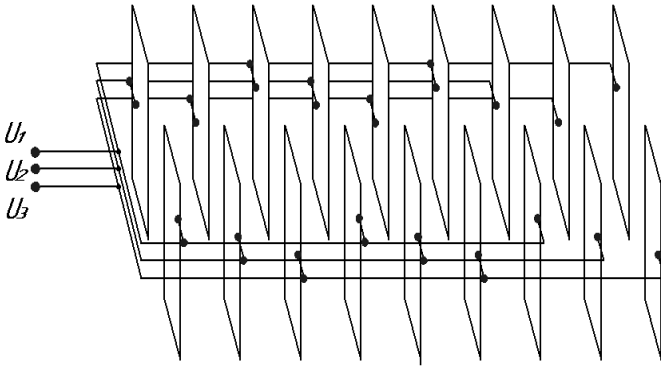


Рис. 2. Система пластинчастих плоских електродів

Для розрахунку таких плоских електричних полів доцільно застосувати методи теорії функції комплексної змінної: метод комплексних потенціалів конформно відображених полів.

Область системи паралельних пластинчастих плоских електродів, що показана на рис. 2, у разі, якщо ці електроди безмежні, є однозв'язною багатокутною областю, для якої були

знайдені функції відображення методом, який базується на використанні інтеграла Кристоффеля-Шварца та комплексний потенціал на підставі інтеграла Шварца:

$$\left. \begin{aligned} W - \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^n (U_{1(k-1)} - U_{1k}) \ln(\omega - a_k) + \\ \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^m (U_{2i} - U_{2(i+1)}) \ln(\omega - c_{i+1}) + \frac{1}{\pi} ((U_{1n} - U_{21}) \ln(\omega - c_1)), \\ z = \frac{h}{\pi} \sum_{k=1}^n \ln(\omega - a_k) - \frac{h}{\pi} \sum_{i=1}^m \ln(\omega - c_i), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де W – комплексний потенціал, В;

U_{1k}, U_{2i} – потенціали електродів відповідно першого та другого рядів, В;

a_k, c_i – коефіцієнти, що визначають координати торців електродів;

h – відстань між електродами в ряду, м;

ω – координати точки області верхньої комплексної півплощини;

z – координати точки області, що знаходиться в багатокутнику з розрізами вздовж променів, що лежать на паралельних прямих.

Електричне поле такої системи електродів описується рівнянням в параметричному вигляді (2):

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}_z = -j \frac{\sum_{k=1}^n \frac{U_{1(k-1)} - U_{1k}}{\omega - a_k} + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{U_{2i} - U_{2(i+1)}}{\omega - c_{i+1}} + \frac{U_{1n} - U_{21}}{\omega - c_1}}{h \sum_{k=1}^n \frac{1}{\omega - a_k} + h \sum_{i=1}^m \frac{1}{\omega - c_i}}; \\ z = \frac{h}{\pi} \sum_{k=1}^n \ln(\omega - a_k) - \frac{h}{\pi} \sum_{i=1}^m \ln(\omega - c_i). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де \vec{E}_z – вектор напруженості поля, В/м;

Коефіцієнти a_k, c_i було знайдено для 8 – електродної області методом підбору для співвідношень $l/h = 0,05; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3$ (l – відстань між рядами електродів).

Таким чином, застосування методу комплексних потенціалів конформно відображених полів дозволило отримати теоретичні формули, які визначають складові напруженості електричного поля в міжелектродній області. Візуалізація електричного поля програмними засобами MATLAB показала, що напруженості поля вздовж рядів електродів змінюються за синусоїдальним законом лише в центрі області, що вказує на наявність неоднорідного пульсуючого поля поблизу електродів. Це поле буде відхиляти частинки від руху вздовж електродів в напрямку цих електродів, оскільки поблизу них напруженість біжучого поля має більшу величину, що є позитивним фактором.

Порівняння аналітичного і чисельного (метод кінцевих елементів у програмних засобах ELCUT) розв'язань задачі – знаходження потенціалів електричного поля системи дворядних плоских пластинчастих електродів показало, що середня відносна розбіжність результатів не перевищує 5%. При співставленні аналітичного розв'язання в системі дворядних плоских пластинчастих електродів з чисельним в системі циліндричних електродів малого діаметру виявлено, що розбіжність не перевищує 14,2%, а в центрі області – 5,2%, що підтверджує доцільність використання аналітичного розв'язання для опису електричного поля та поля сил багаторядних систем циліндричних електродів тільки в центрі міжелектродної області.

Знаходження величини напруженості електричного поля ще не визначає сили, що діють на поляризовану частинку в електричному полі, тому що у формулу (1) для сили, крім складових напруженості, входять складові похідних від напруженості. Для знаходження функційної залежності, що описує поле сил, отримано вираз сили через комплексний потенціал:

$$\vec{F} = A \frac{dW_z}{dz} \frac{d^2 W_z}{dz^2}, \quad (6)$$

де W_z – комплексний потенціал в області Z , В.

Після диференціювання параметрично заданих функцій та введення наступних позначень для похідних:

$$B = \frac{dW_{\omega}}{d\omega} = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n \frac{U_{1(k-1)} - U_{1k}}{\omega - a_k}, \sum_{i=1}^{m-1} \frac{U_{2i} - U_{2(i+1)}}{\omega - c_{i+1}}, \frac{U_{1n} - U_{21}}{\omega - c_1} \right); \quad (7)$$

$$C = \frac{d^2 W_{\omega}}{d\omega^2} = -\frac{1}{\pi} \left(\sum_{k=1}^n \frac{U_{1(k-1)} - U_{1k}}{(\omega - a_k)^2} + \sum_{i=1}^{m-1} \frac{U_{2i} - U_{2(i+1)}}{(\omega - c_{i+1})^2} + \frac{U_{1n} - U_{21}}{(\omega - c_1)^2} \right); \quad (8)$$

$$D = \frac{dz}{d\omega} = \frac{h}{\pi} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{\omega - a_k} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{\omega - c_i} \right); \quad (9)$$

$$H = \frac{d^2 z}{d\omega^2} = -\frac{h}{\pi} \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{(\omega - a_k)^2} + \sum_{i=1}^m \frac{1}{(\omega - c_i)^2} \right), \quad (10)$$

отримано наступну систему формул для знаходження поля сил:

$$\left. \begin{aligned} \vec{F} &= \dot{A} \cdot \frac{B}{D} \cdot \frac{\overline{D \cdot C} - \overline{H \cdot B}}{(D)^3}; \\ z &= \frac{h}{\pi} \sum_{k=1}^n \ln(\omega - a_k) + \frac{h}{\pi} \sum_{i=1}^m \ln(\omega - c_i). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Аналіз формул (7)...(11) засвідчує, що сила обернено пропорційна третій степені розміру області (відстані між електродами в ряду) h . Візуалізація поля сил (рис. 3, а) показує, що складові F_y в біжучому полі, які спрямовані вздовж рядів електродів, однорідні в центрі області та збільшуються поблизу електродів. Сила у всій області має однаковий напрям, який змінюється за зміни чергування фаз. Складові F_x , що спрямовані перпендикулярно рядам електродів (рис. 3, б), незначні порівняно із складовими F_y і присутні тільки поблизу електродів.

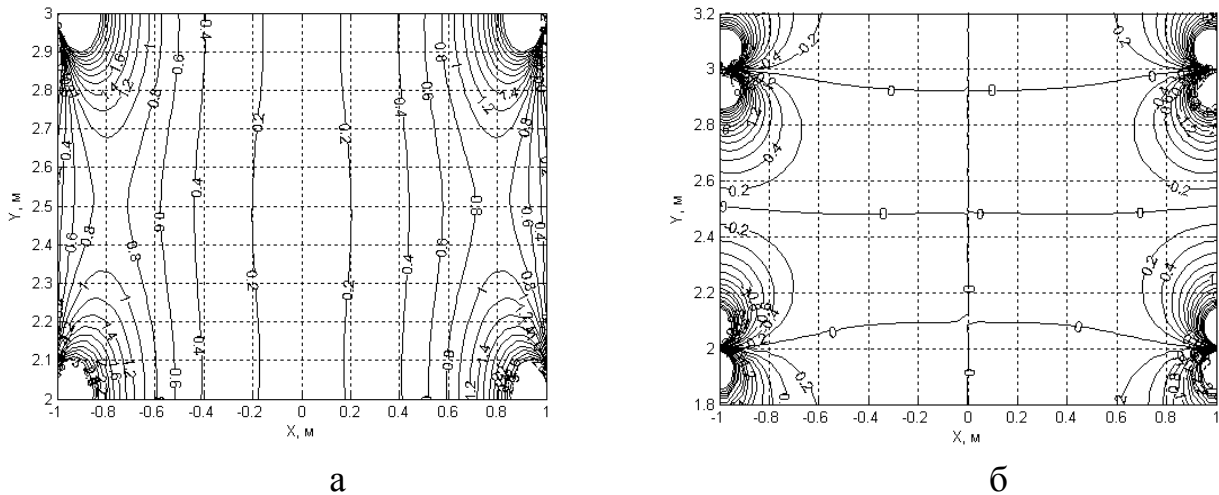


Рис. 3. Складові сили біжучого поля при $l/h = 2$, $h = 1$ м, $U = 1$ В: а – F_y ; б – F_x

Візуалізація поля сил пульсуючого електричного поля (рис. 4) показує, що складові F_x збільшуються від нуля в центрі до максимальної величини біля електродів.

Розв'язання рівнянь аналітичної моделі поля сил в системі багатofазних плоских електродів дозволило обґрунтувати застосування таких систем електродів у пристроях очищення та сепарації як періодичної, так і неперервної дії та використати отримані результати в теоретичних дослідженнях динаміки руху частинок у цих пристроях.

Для обґрунтування методів, дослідження процесів та розробки технічних засобів визначення електрофізичних властивостей суспензії була створена математична модель поля моментів сил в обертовому полі. Для створення такого поля застосовуються електроди з осовою симетрією, на які подається симетрична

багатофазна напруга (рис. 5). При цьому, кожен з електродів є джерелом пульсуючого поля.

Така система електродів на площині, перпендикулярній осі, була представлена у вигляді криволінійної смуги з n рукавами, обмеженої узагальненою гіперболою n -го порядку. Для такої системи електродів знайдено комплексний потенціал за допомогою дробно-лінійного перетворення інтеграла Шварца та функцію, що відображує:

$$\left. \begin{aligned} W &= \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{n-1} U_k \ln \left(\frac{1 - \frac{\theta}{e^{j\frac{2\pi(k+1)}{n}}}}{1 - \frac{\theta}{e^{j\frac{2\pi k}{n}}}} \right) + U_n \ln \left(\frac{1 - \frac{\theta}{e^{j\frac{2\pi}{n}}}}{1 - \theta} \right); \\ z &= \frac{\theta}{(1 - \theta^n)^{1/n}}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де U_k – потенціал k -го електроду, В;

n – кількість електродів;

θ – координати точки області одиничного круга;

z – координати точки області обмеженої узагальненою гіперболою.

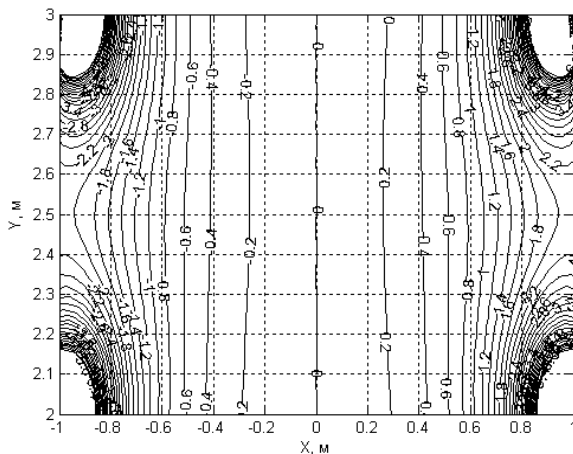


Рис. 4. Складова сили E_x пульсуючого поля при $l/h = 2$, $h = 1$ м, $U = 1$ В

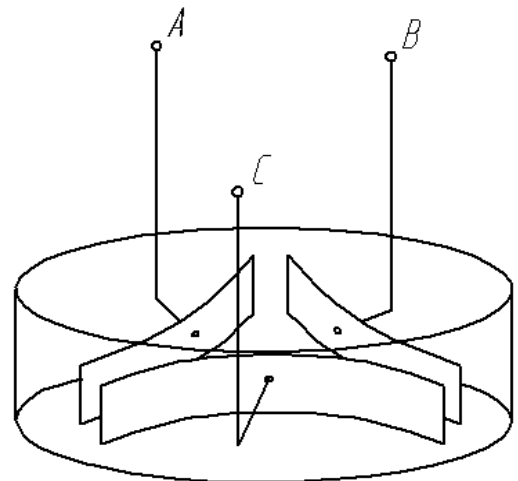


Рис. 5. Трифазна система гіперболічних електродів

Отримана формула для напруженості поля в параметричному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} E &= -\frac{j}{\pi} \frac{\sum_{k=1}^{n-1} U_k \left(\frac{1}{e^{j\frac{2\pi(k+1)}{n}} - \theta} - \frac{1}{e^{j\frac{2\pi k}{n}} - \theta} \right) + U_n \left(\frac{1}{e^{j\frac{2\pi}{n}} - \theta} - \frac{1}{1 - \theta} \right)}{(1 - \theta^n)^{-\left(\frac{1}{n} + 1\right)}}; \\ z &= \frac{\theta}{(1 - \theta^n)^{1/n}}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Візуалізація поля показала, що середня напруженість електричного поля в центрі міжелектродної області системи трифазних гіперболічних електродів становить 0,85 В/м, а середня неоднорідність – 1 В/м². Середня напруженість електричного поля в центрі міжелектродної області системи чотирифазних гіперболічних електродів становить 0,9 В/м, а середня неоднорідність – 0,25 В/м² за діючого значення потенціалів електродів 1 В. Порівняльний аналіз трифазної та чотирифазної системи гіперболічних електродів вказує на доцільність застосування чотирифазної системи, оскільки таке поле має вищу однорідність і надає можливість більш точного математичного розрахунку процесів взаємодії поля з частинками речовини.

Для побудови теоретичної моделі поля моментів сил отримано теоретичний вираз моменту через комплексний потенціал:

$$\vec{M} = \text{Im} \left(\left(A \frac{dW}{dz} \right) \cdot \overline{\frac{dW}{dz}} \right). \quad (14)$$

Для поля, створеного гіперболічними електродами можна записати:

$$\left. \begin{aligned} \vec{M} &= \text{Im} \left(\left(A \begin{pmatrix} W'_\theta \\ z'_\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W'_\theta \\ z'_\theta \end{pmatrix} \right) \right) \\ z &= \frac{\theta}{(1 - \theta^n)^{1/n}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де

$$W'_\theta = \frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^n U_k \left(\frac{1}{e^{j \frac{2\pi(k+1)}{n}} - \theta} - \frac{1}{e^{j \frac{2\pi k}{n}} - \theta} \right) + U_n \left(\frac{1}{e^{j \frac{2\pi}{n}} - \theta} - \frac{1}{1 - \theta} \right), \quad (16)$$

$$z'_\theta = \frac{dz}{d\theta} = (1 - \theta^n)^{-\left(\frac{1}{n}+1\right)}. \quad (17)$$

Візуалізація поля моментів сил (рис. 6) показує, що чотирифазна система має одноріднішу структуру в центрі області. Середня неоднорідність для чотирифазної системи становить 0,15 Н·м/м, а для трифазної системи – 0,7 Н·м/м, при цьому поле моментів чотирифазної системи не змінюється на відстані 0,3 м від центра області, а трифазної – на відстані 0,1 м. Тому для визначення діелектричної проникності та питомої електропровідності рідини і частинок домішок потрібно використовувати чотирифазну систему електродів, яка створює однорідне поле моментів у центрі області величиною 1,6 Н·м за розмірів області 1 м, діючій напрузі на електродах – 1 В, параметрі суспензії $A = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}^3/\text{В}^2$.

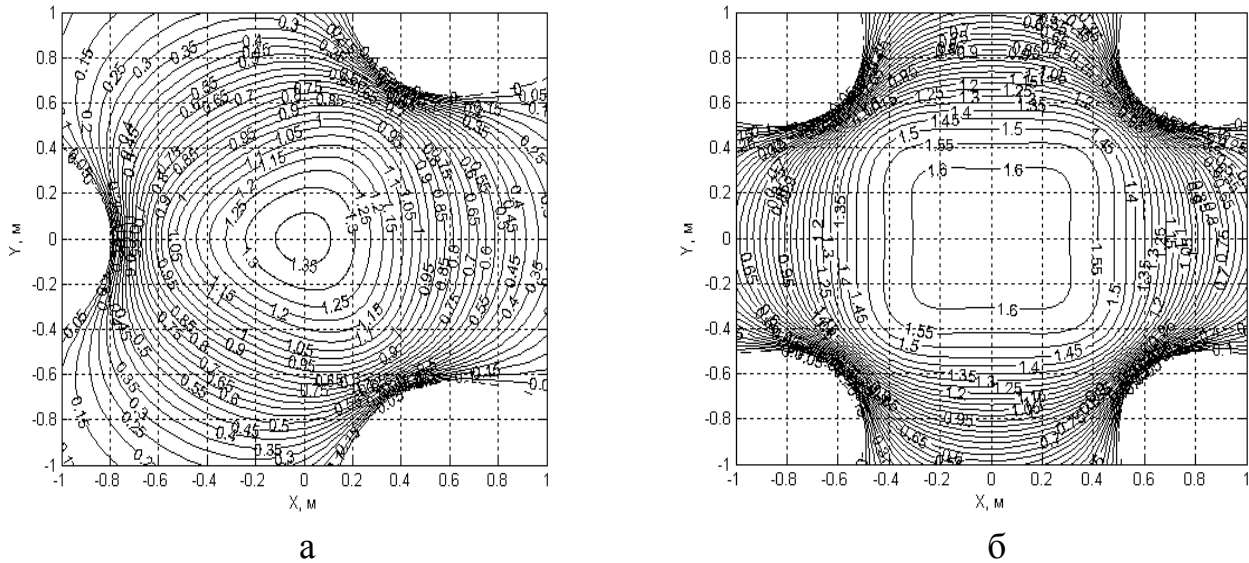


Рис.6. Поле моментів сил в трифазній (а) та чотирифазній (б) системі гіперболічних електродів при $U = 1$ В

Отримані картини поля для характерного розміру області $Z = 1$ м та діючих значень потенціалів електродів 1 В, відповідно до методу комплексного потенціалу та властивостям конформних перетворень, дають змогу визначити значення сил та моментів областей з довільним розміром та значеннями потенціалів.

Теоретичні дослідження взаємодії електричного поля з поляризованими частинками суспензії показали, що багатofазні системи електродів створюють крім пульсуючого поля ще й біжуче, яке створює додаткову силу, спрямовану вздовж рядів електродів, та обертове, що створює момент сили. Отримані теоретичні формули дозволили описати електричне поле і поле сил у багаторядних системах електродів і електричне поле та поле моментів сил в системах гіперболічних електродів.

Результати моделювання показали обґрунтованість використання біжучого поля для очищення слабопровідних суспензій в пристроях безперервної дії, а обертового – для визначення електрофізичних характеристик суспензії. Таким чином у розділі розроблено математичний апарат для подальших досліджень процесів очищення і сепарації та розробки методів визначення електрофізичних характеристик слабопровідних суспензій.

У третьому розділі «ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЛАБОПРОВІДНИХ СУСПЕНЗІЙ» обґрунтовано, розроблено та досліджено методи визначення електрофізичних властивостей суспензій в обертовому електричному полі, які дозволяють визначати діелектричну проникність та питому електропровідність частинок суспензії без їх вилучення з рідини. Визначення цих показників дає змогу розрахувати частоту поля, за якої сила, що діє на частинку, буде максимальною і забезпечить ефективне очищення суспензії.

Визначення діелектричної проникності і питомої електропровідності частинок та рідини ґрунтується на теоретичних залежностях (1). Ці функції пов'язують момент, що діє на частинку, зважену в рідині, кутову частоту та невідомі параметри: діелектричні проникності рідини і частинки та їх питомі електропровідності. Вигляд залежності моменту від кутової частоти зумовлюється уявною частиною комплексного параметра \dot{A} (рис. 1, б) за формулою (3) і дозволяє визначити невідомі параметри (діелектричні проникності і питомі електропровідності середовища та частинки) за допомогою сукупних вимірювань.

Частота, яка відповідає максимальним величинам сили в біжучому полі і моменту в обертовому полі, залежить від електрофізичних властивостей частинки та середовища: $\sigma_{\text{ч}}, \varepsilon_{\text{ч}}, \sigma_{\text{с}}, \varepsilon_{\text{с}}$ і визначається за формулою

$$\omega = \frac{\sigma_{\text{ч}} + 2\sigma_{\text{с}}}{\varepsilon_{\text{ч}} + 2\varepsilon_{\text{с}}} \quad (18)$$

Залежність (3) дозволяє визначити два невідомих параметри за результатами двох сукупних вимірювань. З цієї функції були отримані наступні співвідношення:

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_1 - k\omega_2}{k\omega_1 - \omega_2}} \omega_1 \omega_2, \quad (19)$$

де ω_1, ω_2 – кутова частота відповідно у першій та другій точці вимірювання, рад/с;

$$k = \frac{M_2 E_1^2}{M_1 E_2^2} = \frac{M_2 U_1^2}{M_1 U_2^2}, \quad (20)$$

де M_1, M_2 – момент сили відповідно у першій і другій точці, Н·м;

E_1, E_2 – напруженість електричного поля відповідно в першій і другій точці, В/м;

U_1, U_2 – напруги на електродах, які відповідають напруженостям електричного поля відповідно E_1 і E_2 , В;

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{ч}} &= \frac{12\pi\varepsilon_{\text{с}} a^3 E^2 (\sigma_{\text{с}} - \varepsilon_{\text{с}} \omega)}{\left(\frac{\omega_1}{\omega} + \frac{\omega}{\omega_1}\right) M_1} - 2\sigma_{\text{с}}; \\ \varepsilon_{\text{ч}} &= \frac{12\pi\varepsilon_{\text{с}} a^3 E^2 (\sigma_{\text{с}} - \varepsilon_{\text{с}} \omega)}{\left(\frac{\omega_1}{\omega} + \frac{\omega}{\omega_1}\right) M_1 \omega} - 2\varepsilon_{\text{с}}; \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{ч}} &= \frac{2\omega_{\text{с}1}'' (\sigma_{\text{с}1} \frac{\sigma_{\text{с}2} + \varepsilon_{\text{с}2} \omega_{\text{с}2}''}{\omega_{\text{с}1}'' - \omega_{\text{с}2}''} + \varepsilon_{\text{с}1} \omega_{\text{с}1}'')}{\omega_{\text{с}1}'' - \omega_{\text{с}2}''} + 2\varepsilon_{\text{с}1} \omega_{\text{с}1}'' - 2\sigma_{\text{с}1}; \\ \varepsilon_{\text{ч}} &= \frac{2(\sigma_{\text{с}1} - \sigma_{\text{с}2} + \varepsilon_{\text{с}2} \omega_{\text{с}2}'' - \varepsilon_{\text{с}1} \omega_{\text{с}1}'')}{\omega_{\text{с}1}'' - \omega_{\text{с}2}''}, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

де $\omega_{\text{с}1}''$ – кутова частота в екстремальній точці для кулі з характеристиками $\varepsilon_{\text{ч}}, \sigma_{\text{ч}}$, яка знаходиться в рідині з характеристиками $\varepsilon_{\text{с}1}, \sigma_{\text{с}1}$;

$\omega_{\text{с}2}''$ – кутова частота в екстремальній точці для кулі з характеристиками $\varepsilon_{\text{ч}}, \sigma_{\text{ч}}$, яка знаходиться в рідині з характеристиками $\varepsilon_{\text{с}2}, \sigma_{\text{с}2}$.

Для визначення ϵ_c, σ_c , було застосовано два методи: метод абсолютних моментів та метод зустрічних моментів.

Для методу абсолютних моментів використовують формули (19)...(21). Для розрахунку властивостей частинок вимірюються ϵ_c, σ_c, a . Кутові частоти ω_1, ω_2 і відповідні моменти M_1, M_2 вимірюються в двох довільних точках. Напруженість поля E розраховується на підставі результатів дослідження поля чотирифазних гіперболічних електродів з радіусом кола R , яке вписане в міжелектродну область, за формулою $E = 0,757 U/R$.

Для методу зустрічних моментів використовують формули (19), (20), (22). Згідно даного методу на електроди подають одночасно дві системи чотирифазних напруг різної частоти з прямим та зворотним чергуванням фаз, таким чином створюючи два поля, що обертаються назустріч одне одному. Обидва поля діють на частинку, створюючи протилежні моменти сил. В обох системах напруг встановлюються довільні, але різні кутові частоти. Вимірюються значення напруг, при яких зважена частинка суспензії не обертається, тобто моменти, що діють на частинку від двох зустрічних полів, однакові: $M_1 = M_2$. Розраховується параметр k за формулою (20), який з урахуванням рівності моментів дорівнює відношенню квадратів відповідних напруг. За формулою (19) визначається кутова частота, що відповідає екстремуму $\omega_{\epsilon 1}$ в рідині з властивостями $\epsilon_{c1}, \sigma_{c1}$. Проводяться аналогічні вимірювання $\omega_{\epsilon 2}$ в рідині з властивостями $\epsilon_{c2}, \sigma_{c2}$. Властивості рідини змінюють, наприклад, додаванням розчинника. Далі за формулами (22) розраховуються ϵ_r, σ_r .

Нами отримано формули для визначення властивостей рідини за відомими властивостями пробних куль, що дало змогу не застосовувати інші методи визначення ϵ_c, σ_c .

Встановлено, що перевагою методу зустрічних моментів є усунення похибок, пов'язаних з виміром моменту, діаметру кулі та розмірів камери, відсутністю потреби у фіксації частинок, що дало можливість визначати властивості дрібних зважених частинок суспензії без їх вилучення з рідини.

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено дослідну установку (рис. 7) з приладом вимірювання моментів малої величини від 0,2 до 2

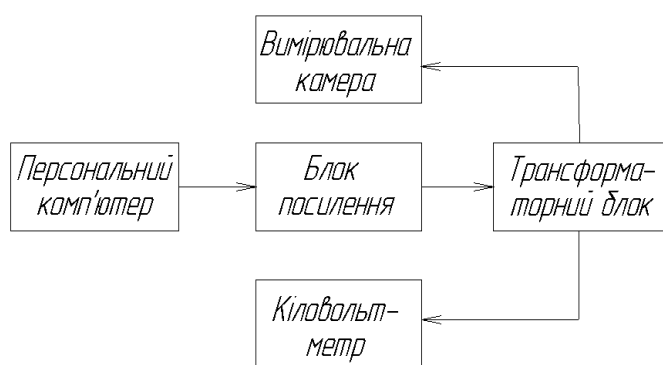


Рис. 7. Структурна схема дослідної установки

мкН·м, який встановлювався у

вимірювальній камері. Камера обладнана чотирифазною системою електродів у вигляді гіперболічних циліндрів. Персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням виконує функцію двофазного генератора регульованої низької частоти, а також пристрою

візуалізації дрібних частинок при визначенні властивостей суспензії методом зустрічних моментів. Двофазний сигнал з виходів звукової карти комп'ютера посилювався блоком підсилювання. Трансформаторний блок призначений для підвищення напруги до 10 кВ та створення чотирифазної системи напруг з двофазної за допомогою чотирьох трансформаторів. При подачі такої напруги на електродну систему в камері створювалось обертове електричне поле.

Ефективність методів визначення властивостей суспензії визначалась на зразках соняшникової олії та олеїнової кислоти, в яких знаходиться текстолітова куля діаметром 10 мм.

За результатами вимірювання моменту в обертовому полі нами отримано залежності (рис. 8), які підтвердили теоретичні положення стосовно наявності в них одного максимуму. За цими залежностями розраховано значення питомої електропровідності та діелектричної проникності матеріалу кулі:

$$\sigma_{\psi 1} = (1,05 \pm 0,13) 10^{-7} \text{ См/м}, \quad \epsilon_{\psi 1} = (7,95 \pm 0,14) 10^{11} \text{ Ф/м} - \text{ у соняшковій олії};$$

$$\sigma_{\psi 2} = (0,97 \pm 0,19) 10^{-7} \text{ См/м}, \quad \epsilon_{\psi 2} = (7,55 \pm 2,22) 10^{11} \text{ Ф/м} - \text{ в олеїновій кислоті}.$$

Відносна похибка вимірювання величини діелектричної проникності матеріалу кулі в соняшковій олії складала 5,6%, в олеїновій кислоті – 0,66%.

Відносна похибка вимірювання величини питомої електропровідності матеріалу кулі в соняшковій олії складала 5%, в олеїновій кислоті – 3%.

Визначення електрофізичних властивостей матеріалу кулі методом зустрічних моментів показало наступні результати:

$$\sigma_{\psi} = (2,48 \pm 0,16) 10^{-8} \text{ См/м};$$

$$\epsilon_{\psi} = (7,53 \pm 0,66) \cdot 10^{11} \text{ Ф/м}.$$

Відносна похибка визначення σ_{ψ} складає 0,8%, ϵ_{ψ} – 0,4%. Менші відносні похибки підтверджують перевагу методу зустрічних моментів завдяки усуненню похибок, пов'язаних з виміром моменту, діаметру кулі та розмірів камери у методі абсолютних

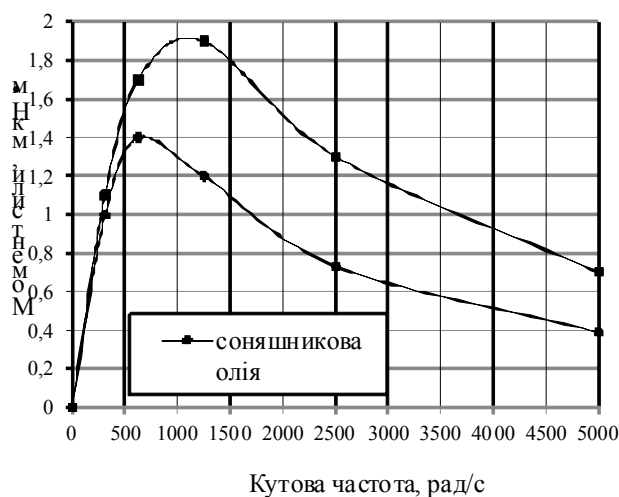


Рис. 8. Залежності моменту від кутової частоти

моментів.

За допомогою методу зустрічних моментів отримано залежності діелектричної проникності та питомої електропровідності соняшкового шроту від його вологості. Встановлено, що при зміні вологості в межах від 4 до 18% діелектрична проникність змінюється в межах від 40 до 90 пФ/м, а питома електропровідність – від 29 до 1500 нСм/м.

У четвертому розділі «ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ І СЕПАРАЦІЇ СЛАБОПРОВІДНИХ СУСПЕНЗІЙ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ» на підставі розробленої вище теоретичної моделі поля сил, теоретичної моделі процесу очищення у вигляді диференціальних рівнянь руху частинок суспензії та їх розв'язань обґрунтовано ефективні параметри електродних систем і систем напруг пристроїв електричного очищення і сепарації, а саме: відстань між електродами в ряду h , відношення відстані між рядами l до h (l/h), кількість фаз та схему подачі напруги на електроди.

Відомо, що зміна співвідношення розмірів l/h при $h = \text{const}$ призводить до зміни конфігурації поля, а тому і до зміни поля сил. Тоді можна знайти таке співвідношення, при якому за однакової напруженості поля на поверхні електродів (найбільша напруженість в міжелектродній області) отримаємо поле сил з найбільшим значенням величини середньої сили. Поле сил розраховується за формулами (4)...(8). Середня сила визначається як:

$$\vec{F}_c = \frac{1}{S_z} \iint_Z \vec{F}_c(x, y) dx dy = \frac{1}{S_z} \int_a^b dx \int_c^d \vec{F}_c(x, y) dy, \quad (23)$$

де \vec{F}_c – середня сила в міжелектродній області, Н;

S_z – площа області Z , що обмежена кривими $x = a$, $x = b$, $y = c$, $y = d$, м^2 ;

$\vec{F}_c(x, y)$ – векторна функція, що описує поле сил, Н.

Для фактичного розрахунку середньої сили використано графо-аналітичний метод.

Відповідно формулам (1), (11) величина сили пропорційна квадрату потенціалів електродів або квадрату напруженості поля. Відносну величину сили, приведену до однакової напруженості поля, можна визначити за формулою

$$F_{\text{св}} = \frac{F_c}{kE^2}, \quad (24)$$

де k – коефіцієнт приведення, $\text{Н}\cdot\text{м}^2/\text{В}^2$;

E – напруженість електричного поля, $\text{В}/\text{м}$.

Отримані теоретичні залежності (рис. 9) приведені середньої сили,

розрахованої за формулами (23) (24) при $k = 1 \text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{В}^2$ і діючому значенні напруги

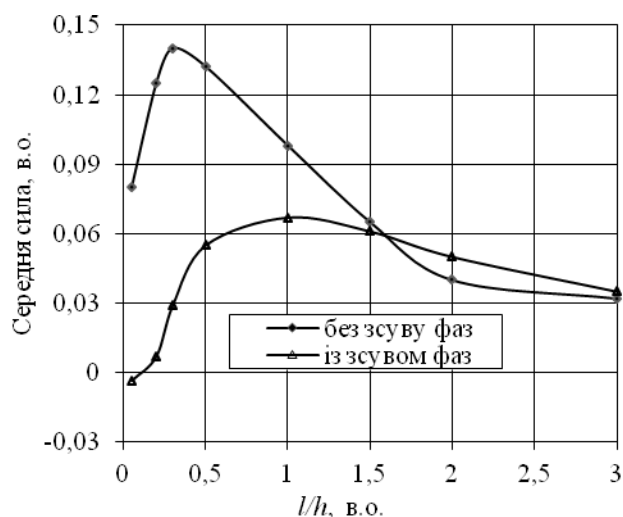
на електродах – 1 В. Розглянуто випадки двофазної симетричної системи напруг, яка створює пульсуюче поле і три- та чотирифазні системи напруг, які створюють як пульсуюче, так і біжуче поля. Як показали результати моделювання поля сил, у двофазній симетричній системі сила направлена до електродів, тому в міжелектродній області суттєвою є X-складова сили. Для трифазних і

чотирифазних систем до цієї сили додається сила з боку біжучого поля, у якій суттєвою є Y-складова.

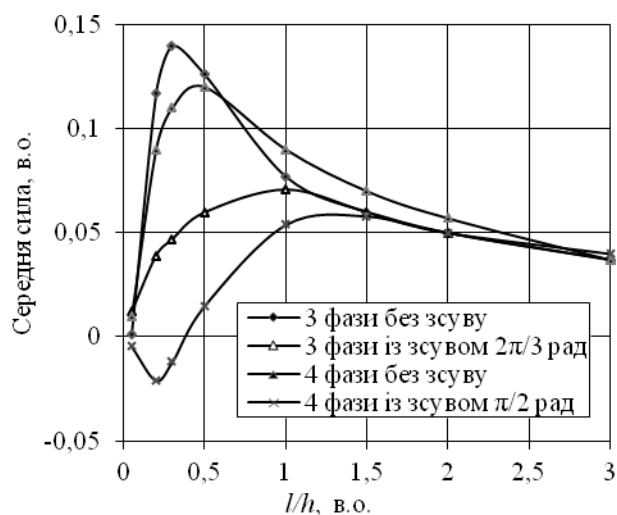
Із залежностей (рис. 9, а) виходить, що для двофазних систем електродів без зсуву фаз між рядами області максимальна середня X-складова сили пульсуючого поля знаходиться в інтервалі відносних розмірів міжелектродної області від 0,2 до 0,7, а із зсувом фаз – від 0,5 до 1,5. Максимальна величина середньої сили в 2 рази вища для напруги без зсуву фаз, тому для очищення слабопровідних суспензій в полі пластинчастих електродів із симетричною двофазною напругою (або однофазною), призначених для вловлювання частинок суспензії в чарунках-накопичувачах, доцільно використовувати схему подачі напруги без зсуву фаз на протилежних електродах, а у разі постійного струму на таких електродах повинен бути однаковий знак потенціалу.

X-складова максимальної середньої сили пульсуючого поля, яка направлена поперек рядів електродів для трифазних і чотирифазних симетричних систем напруги (рис. 9, б), відповідає випадку подачі напруги без зсуву фаз між протилежними електродами і лежить у межах співвідношення розмірів для трифазних систем від 0,2 до 0,7, а чотирифазних систем – від 0,3 до 0,7. Максимальна величина середньої сили у 2 рази вище для напруги без зсуву фаз, тому для пристроїв очищення з пластинчастими електродами, призначеними для вловлювання та накопичення частинок суспензії у чарунках-накопичувачах, доцільно застосовувати симетричні багатофазні системи з подачею напруги без зсуву фаз між протилежними електродами.

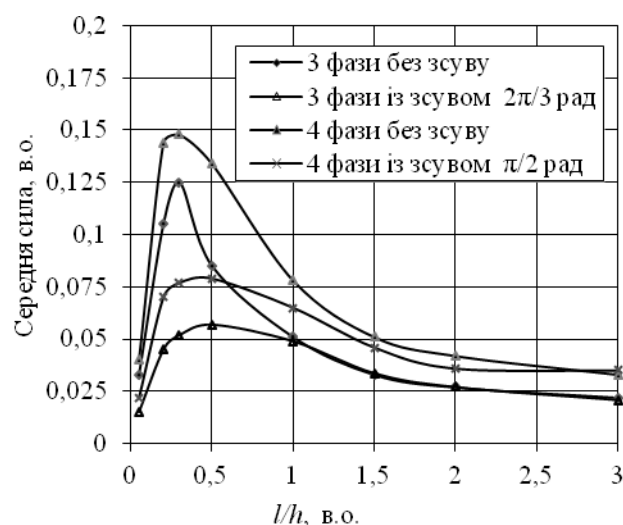
Y-складова максимальної середньої сили у біжучому полі, що направлена вздовж рядів електродів для трифазних та чотирифазних симетричних систем напруги, відповідає випадку подачі напруги без зсуву фаз між протилежними електродами і лежить в межах співвідношення розмірів від 0,2 до 0,6 для чотирифазних систем і від 0,2 до 0,4 – для трифазних, а її максимальна величина відповідає співвідношенню близько 0,3. Максимальна величина середньої сили в 1,7 разів вище для напруги без зсуву фаз, тому для пристроїв очищення і сепарації з циліндричними багаторядними системами електродів, призначеними для накопичення частинок на краях рядів, доцільно застосовувати симетричні багатофазні системи з подачею напруги без зсуву фаз між протилежними електродами.



а



б



в

Рис. 9. Залежності приведеної середньої сили від співвідношення розмірів міжелектродної області: а – Х-складова сили в пульсуючому полі двофазної системи; б – Х-складова сили пульсуючого поля в багатофазних системах; в – Y-складова сили біжучого поля в багатофазних системах

Таким чином, теоретичний аналіз впливу геометричних параметрів електродних систем і систем напруг на силу, що діє на поляризовану частинку в електричному полі, дозволив обґрунтувати ефективні параметри електродних систем електричних очищувачів та сепараторів. Для дослідження процесів очищення і сепарації, які полягають в організації руху зважених частинок в електричному полі, яке створюється певною системою електродів та напруг, були створені математичні моделі руху частинки суспензії у пульсуючому та біжучому полях на підставі другого закону Ньютона. Враховувалась сила, яка діє на поляризовану частинку з боку електричного поля та сила опору в'язкої рідини.

Беручи до уваги те, що для пульсуючого поля залежність Х-складової сили від координати має лінійний вигляд, а Y-складовою можна нехтувати у зв'язку з її малою величиною (в центрі області вона дорівнює 0), рівняння руху частинки у пульсуючому полі становить однорідне лінійне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами. Було отримано його аналітичне розв'язання:

$$x = \left(x_0 - \frac{V_0 - x_0 \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1} \right) e^{\gamma_1 t} + \frac{V_0 - x_0 \gamma_1}{\gamma_2 - \gamma_1} e^{\gamma_2 t}, \quad (25)$$

де x_0 – початкова координата частинки, м;

V_0 – початкова швидкість, м/с;

t – час, с;

$\gamma_{1,2}$ – корені характеристичного рівняння, с⁻¹.

$$\gamma_{1,2} = -\frac{9\eta}{4a^2\rho} \pm \sqrt{\left(\frac{9\eta}{4a^2\rho}\right)^2 + \frac{3F^* \operatorname{Re}(\dot{A})U^2}{4\pi a^3 \rho h^4}}, \quad (26)$$

де η – динамічна в'язкість, Па·с;

ρ – густина речовини частинки, кг/м³;

F^* – лінійний коефіцієнт залежності X-складової сили від координати, Н/м.

Отримані формули (25) і (26) дозволяють визначити початкові координати частинок заданих розмірів, які за відведений час досягнуть чарунок-накопичувачів, і, тим самим, визначити теоретичний ступінь очищення рідини за відомою гранулометричною характеристикою суспензії.

У багатофазній системі електродів, окрім пульсуючого, створюється біжуче електричне поле. Якщо частота поля буде такою, що комплексний параметр \dot{A} має тільки уявну складову, то частинка буде рухатись вздовж рядів електродів за рахунок Y-складової сили дії біжучого поля. X - складова сили дії біжучого поля незначна і в більшій частині міжелектродної області дорівнює 0 (рис. 3, б).

Залежності Y-складової сили від координати Y мають нелінійний періодичний вигляд, але величина змінної складової за відношенням до постійної не перевищує 0,05, тому ця сила приймалась такою, яка не залежить від координат. Отже, отримане рівняння за другим законом Ньютона становить лінійне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами та правою частиною. Розв'язання цього рівняння:

$$y = \frac{V_0 - C_3}{\gamma_1} e^{\gamma_1 t} + y_0 - \frac{V_0 - C_3}{\gamma_1} + C_3 t. \quad (27)$$

де

$$\gamma_1 = -\frac{9\eta}{2a^2\rho}, \quad (28)$$

$$C_3 = \frac{F^* \operatorname{Im}(\dot{A})U^2}{6\pi\eta a h^3}. \quad (29)$$

Якщо створити два зустрічно біжучих поля, то кожне з них буде діяти на частинку, а сумарна сила дорівнюватиме $F_1 = F_1(\omega_1) - F_1(\omega_2)$. Тоді в розв'язанні рівняння руху коефіцієнт C_3 дорівнюватиме:

$$C_3 = \frac{F^* \operatorname{Im}(\dot{A}(\omega_1) - \dot{A}(\omega_2))U^2}{6\pi\eta a h^3}. \quad (30)$$

Таким чином, побудова математичних моделей у вигляді диференціальних рівнянь руху частинки суспензії в електричному полі, його дослідження і розв'язання дозволяють отримати теоретичні залежності координати частинок різного діаметру від часу. Це надасть змогу розрахувати ступінь очищення і коефіцієнт розділення за відведений час та порівняти результат з експериментальними дослідженнями, а також використовувати у методиках розрахунків пристроїв очищення і сепарації.

Теоретично встановлено, що зменшення розмірів міжелектродної області призводить до підвищення швидкості руху частинок за незмінної напруженості електричного поля. В пульсуючому полі системи двофазних електродів швидкість частинки діаметром 40 мкм, яка знаходиться в середовищі з параметрами соняшникової олії, через 180 с збільшується з 0,003 до 0,14 мм/с при зменшенні міжелектродної відстані з 40 до 15 мм і відповідному зменшенні напруги з 40 до 15 кВ. В біжучому полі системи чотирифазних електродів швидкість частинки діаметром 100 мкм через 100 с збільшується з 0,28 до 1,1 мм/с при зменшенні міжелектродної відстані з 8 до 2 мм і відповідному зменшенні напруги з 8 до 2 кВ, що доводить доцільність зменшення міжелектродних розмірів для підвищення продуктивності електроочищувачів і електросепараторів.

Теоретичні дослідження динамік частинок у двох біжучих полях різної частоти підтвердили можливість розділення їх за ознакою електрофізичних властивостей: діелектричної проникності і питомої електропровідності. Частинка діаметром 100 мкм, у якої діелектрична проникність – $2,1 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, питома електропровідність – 10^{-7} См/м та частинка такого ж діаметру, у якої діелектрична проникність – $2,9 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, питома електропровідність – $4 \cdot 10^{-8}$ См/м, яка знаходяться у соняшниковій олії при напрузі на електродах 2000 В та міжелектродному розмірі 1,5 мм, за 100 с розійдуться на відстань 110 мм і будуть розділені за ознаками електрофізичних властивостей.

У п'ятому розділі «ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЧИЩЕННЯ ТА СЕПАРАЦІЇ СЛАБОПРОВІДНИХ СУСПЕНЗІЙ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ» наведено результати досліджень, які проводились на суспензіях частинок соняшникового шроту різної вологості у рафінованій соняшниковій олії. Така суспензія дозволила порівняти теоретичні показники, які розраховувались за формулами (25) і (27), з експериментальними даними. Крім того, експериментально досліджувались процеси очищення і сепарації нефільтрованої соняшникової олії.

Вміст домішок визначався ваговим методом. За критерії оцінки процесу прийнято такі показники, як ступінь очищення – відношення маси вловлених частинок до їх вихідної маси та коефіцієнт розділення – відношення маси вловлених частинок кожної з фракцій до їх вихідної маси.

Досліджено процес очищення у системах багатофазних пластинчастих пласких електродів. Області між електродами кожного з рядів представляли собою чарунки-накопичувачі вловлених частинок. В системі таких електродів, окрім пульсуючого поля, яке дозволяє вловлювати частинки, між рядами існує біжуче поле, яке рухає частинки вздовж рядів. Тому ступінь очищення для

пульсуючого поля визначався при відкритих чарунках. З метою визначення ступеня очищення в біжучому полі між рядами встановлювались діелектричні перегородки, яке перекривали рух частинок у чарунки (рис. 10).

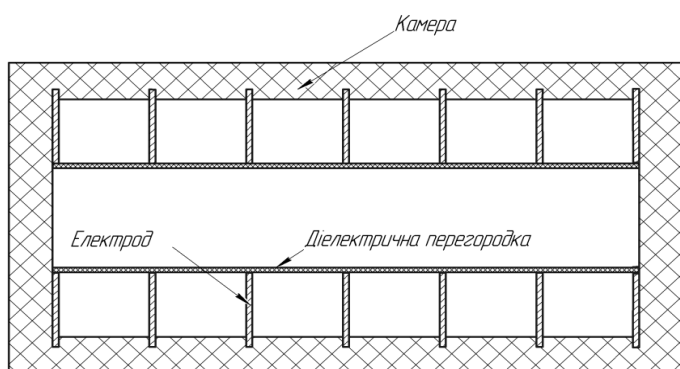


Рис. 10. Конструкція камери з діелектричними перегородками

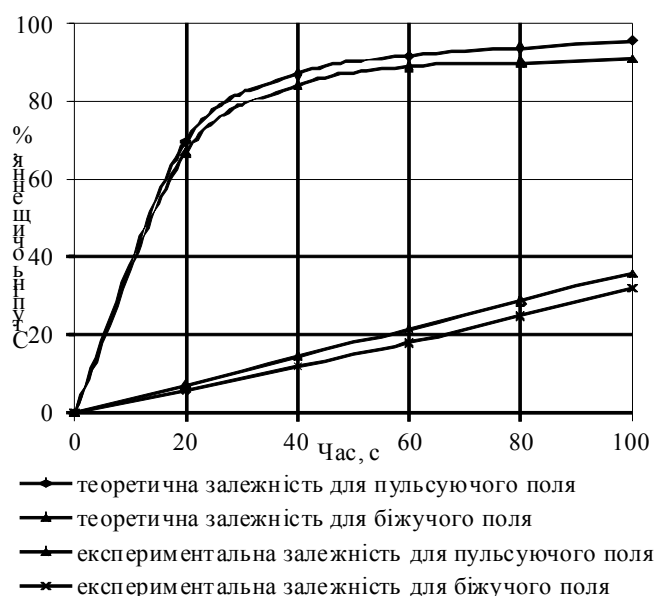


Рис. 11. Динаміка очищення соняшникової олії від шроту

соняшникової олії від нежирових домішок у вигляді шроту 90% за 70 с (рис. 11). Це дозволяє зробити висновок, що такі системи електродів доцільно застосовувати у пристроях очищення періодичної дії за малого вмісту домішок (до 0,1%).

Для очищення та сепарації рідин в біжучому полі, щоб уникнути ефекту впливу Х-складової сили пульсуючого поля, доцільно використовувати діелектричні перегородки, як показано на рис. 10, але більш ефективним є застосування циліндричних електродів, в яких на відміну від пластинчастих, частинки не затримуються поблизу електродів, а рухаються вздовж них. Такі

Дослідження проводились для електродних систем із співвідношеннями розмірів, що відповідають максимальній приведеній середній силі: $h = 10$ мм, $l/h = 0,3$ – для двофазних та трифазних систем без зсуву фаз; $h = 10$ мм, $l/h = 0,5$ – для чотирифазних систем без зсуву фаз; $h = 10$ мм, $l/h = 1$ – для всіх систем напруг із зсувами фаз (рис. 9).

Результати експериментів підтвердили теоретичні положення щодо побудованих моделей електричного поля, поля сил та динаміки руху частинок в електричному полі багатофазних систем електродів. Теоретичні залежності, зображені на рис. 11, будувались на підставі формул (25)...(29). Розбіжність теоретичних показників очищення та розділення з експериментальними не перевищила 11%. Було встановлено, що найбільш ефективно процес очищення відбувається у пульсуючому полі двофазних або трифазних систем електродів без зсуву фаз між протилежними електродами, що забезпечує ступінь очищення

В експериментальних дослідженнях процесу розділення нежирової та фосфатидної фракції соняшникової олії гідратація фосфатидів здійснювалась за вмісту води на рівні 1,5%. Процес гідратації проводився таким же чином, як і у попередньому досліді, але з олії не видалялись нежирові домішки. Результати розділення фракцій гідратованої олії (рис. 13) показують, що коефіцієнти розділення дещо менші за відповідні ступені очищення фракцій, але ця різниця невелика – до 8%. Час проведення процесу розділення порівняно з процесами очищення збільшується та досягає 300 с для розділення обох фракцій, що пов'язано зі зменшенням напруг кожної з частот у два рази.

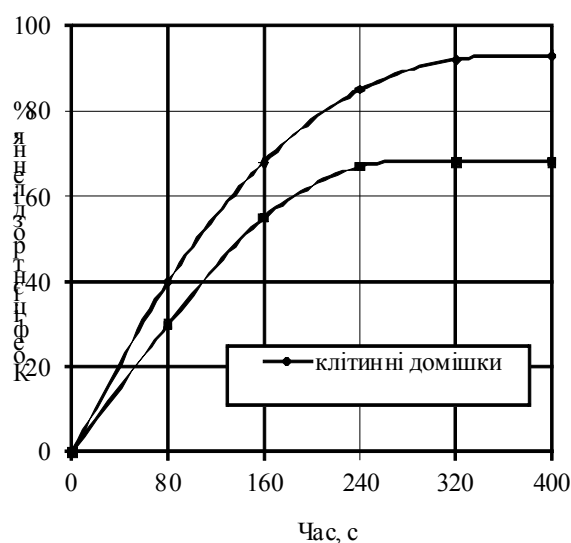


Рис. 13. Динаміка розділення нежирових домішок соняшникової олії від гідратованих фосфатидів

Таким чином, експериментальні дослідження з очищення і сепарації соняшникової олії від нежирових домішок та фосфатидів показали спроможність здійснення як очищення олії від цих домішок, так і їх розділення в біжучому електричному полі: ступінь очищення від нежирових домішок досягає 98%, а від гідратованих фосфатидів – 75% за 70 с. За сепарації цих фракцій коефіцієнт розділення нежирових домішок досягає 90%, а фосфатидів – 68% за 300 с. Порівняно низький ступінь очищення олії від фосфатидів пов'язаний з неповною гідратацією

деяких видів цієї речовини. Використання біжучого поля дозволяє проводити процес у пристроях неперервної дії великого вмісті домішок (понад 0,1%).

Однією з переваг електричного очищення слабопровідних суспензій є малі енергозатрати, які визначаються не тільки питомою електропровідністю суспензії, величиною напруги, але і схемою її подачі та конструкцією електродів.

Електропровідність пластинчастих систем електродів може бути розрахована, якщо відомі їх геометричні параметри: довжина і ширина пластин та їх кількість. Більш значну складність викликає розрахунок електропровідності систем циліндричних електродів. Їх електропровідність залежить від розмірів: відстані між електродами, діаметру та довжини електродів. Електропровідність цих систем електродів була визначена експериментально.

Для двомірних електричних полів, які розглядаються в роботі, фазна електропровідність:

$$Y = K \cdot V \cdot \sigma_c \cdot N, \quad (31)$$

де K – геометричний коефіцієнт системи електродів;

- R – довжина електродів, м;
 σ_c – питома електропровідність рідини, См/м;
 N – кількість електродів.

Експериментальні залежності геометричного коефіцієнту чотирифазних і трифазних систем електродів від співвідношення розмірів міжелектродної області були отримані для електродів різних діаметрів та схем подачі напруги. Вони дали можливість не тільки визначати енергетичні параметри пристроїв очищення з

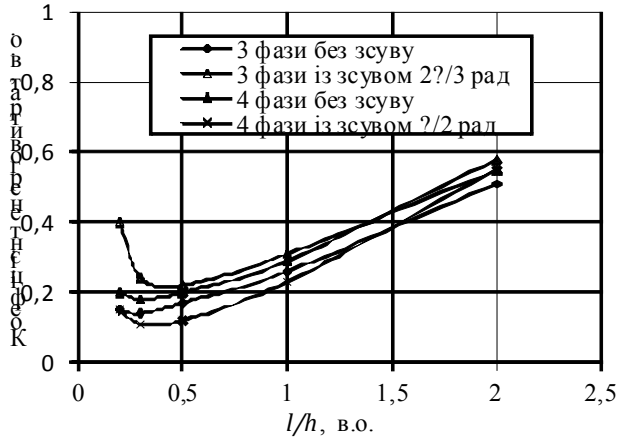


Рис. 14. Залежності коефіцієнту енерговитрат від співвідношення розмірів міжелектродної області

багатофазними циліндричними електродними системами, а й ввести коефіцієнт, за допомогою якого можна оцінити енергетичні витрати на силову дію поля:
 $K_{ен} = K/F_c$.

Отримані залежності (рис. 14) дозволяють визначити геометричні параметри циліндричних електродних систем, що є найбільш енергетично вигідними: мінімальне значення коефіцієнту енерговитрат

лежить в межах $0,3 < l/h < 0,5$, що

відповідає інтервалам максимальної приведенної сили (рис. 9).

У шостому розділі «РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ОЧИЩЕННЯ ТА СЕПАРАЦІЇ СЛАБОПРОВІДНИХ СУСПЕНЗІЙ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ» розроблено і досліджено структуру та технічні засоби комплексу.

Комплекс складається з технологічного блоку очищення і сепарації, вимірювального пристрою і джерела живлення, до складу якого входить персональний комп'ютер, блок посилення та трансформаторний блок (рис. 15). Персональний комп'ютер використовується для отримання двофазної напруги регульованої частоти у складі джерела живлення, а також для візуального спостереження за обертовим рухом частинок суспензії у пристрої вимірювання.

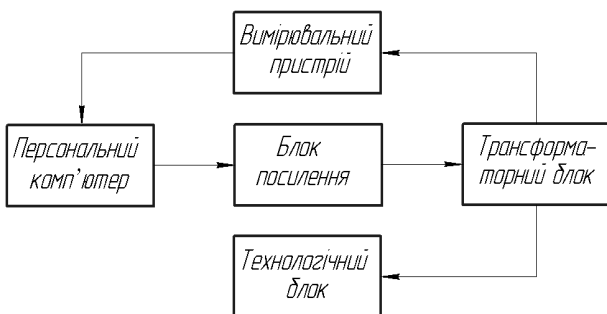


Рис. 15. Структурна схема комплексу

Блок посилення призначений для посилення двофазної напруги регульованої частоти, яка знімається зі звукової карти комп'ютера. Блок зібраний на основі операційних посилювачів ТДА7293.

Трансформаторний блок підвищує двофазну напругу, що поступає з блоку посилення до 6 кВ і одночасно дозволяє

отримати з несиметричної двофазної напруги симетричну чотирифазну.

Вимірювальний пристрій (рис. 16) призначений для визначення діелектричної проникності і питомої електропровідності дисперсних частинок та дисперсійного середовища суспензії. Він вміщує камеру з електродною системою та оптичну систему з ПЗС-матрицею PLEOMAX PWC-4000.

У технологічному блоці (рис. 17) відбувається процес очищення або сепарації в електричному полі. Блок об'ємом 2 дм³ вміщує систему циліндричних електродів, високовольтні клеми, патрубки входу і виходу рідини та осаду.



Рис. 16. Загальний вигляд вимірювального пристрою



Рис. 17. Загальний вигляд технологічного блоку

Всі технічні засоби, за виключенням персонального комп'ютера, зібрані на рамному шасі (рис. 18), що дозволяє зробити комплекс пересувним і застосовувати його на будь-якій ділянці технологічних ліній очищення рідин. Для роботи комплексу у виробничих умовах спочатку визначається частота напруги джерела живлення за допомогою вимірювального пристрою і персонального комп'ютеру відповідно до методики, яка розроблена в третьому розділі. Після цього напруга визначеної частоти подається на електроди технологічного блоку. Через

технологічний блок в неперервному режимі перекачується олія, яка підлягає очищенню.

Всі елементи розробленого комплексу були досліджені та випробувані. В процесі дослідження джерела живлення встановлено, що запропонована схема і технічні засоби дозволяють отримати чотирифазну регульовану напругу до 6 кВ у діапазоні частот від 40 до 1000 Гц, що задовольняє вимогам процесу очищення в електродній системі технологічного блоку та визначення електрофізичних властивостей



Рис. 18. Загальний вигляд комплексу

суспензії в обертовому полі вимірювальної камери. Оптична система вимірювальної камери дозволяє фіксувати обертовий рух частинок діаметром більше 10 мкм, що достатньо для визначення властивостей суспензій, які підлягають очищенню та сепарації. Це надає можливість визначити частоту електричного поля.

Для забезпечення максимальної ефективності очищення і сепарації на електроди технологічного блоку потрібно подавати максимально можливу напругу, яка не призводить до пробую міжелектродних проміжків. У зв'язку з тим, що енергозатрати на процес залежать від величини напруги та питомої електропровідності суспензії, технологічний блок було досліджено на напругу пробую та електропровідність нефільтрованої соняшникової олії. При плануванні експериментів враховувались концентрація домішок, температура і частота. Отримані залежності показали взаємозв'язок пробивної напруги та активної електропровідності з такими факторами, як концентрація домішок та температура олії, а реактивної електропровідності – з температурою та частотою електричного поля.

Виробнича перевірка електротехнологічного комплексу показала, що залишковий вміст нежирових домішок та питомі витрати електроенергії залежать від температури

соняшникової олії. При зміні температури від 25 до 45 °С залишковий вміст нежирових

домішок зменшується з 0,045 до 0,02% за збільшення питомих витрат з 0,095 до 0,152

кВт·год/м³, що пов'язано із зменшенням в'язкості олії та підвищенням її

електропровідності. Цей результат потрібно враховувати для вибору температурного режиму роботи технологічного блоку та визначенні економічних показників роботи комплексу. Розроблений комплекс має більшу ефективність по відношенню до бази

порівняння – прес-фільтру ФПР-16, питомі витрати у якого – 1,7 кВт·год/м³ при

залишковому вмісті нежирових домішок на рівні 0,03%.

Впровадження електротехнологічного комплексу дозволяє отримати чистий дисконтований дохід 44000 грн за продуктивності 1,2 м³/год та річному обсязі 15000 м³.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та вирішення науково-прикладної проблеми, яка полягає у розробці науково-технічних основ

створення і застосування електротехнологічних комплексів очищення і сепарації слабопровідних суспензій у змінному електричному полі високої напруженості, які ґрунтуються на закономірностях взаємодії електричного поля, створеного багатофазними електродними системами, з дисперсними частинками суспензії і забезпечують високоефективне очищення та розділення слабопровідних суспензій за ознаками електрофізичних властивостей.

Отримані теоретичні і експериментальні результати дозволяють зробити наступні загальні висновки.

1. На основі теоретичних досліджень взаємодії електричного поля з поляризованими частинками суспензії обґрунтовано доцільність застосування у пристроях очищення і сепарації неперервної дії багатофазних систем електродів, які створюють біжуче електричне поле і дозволяють не тільки осаджувати частинки на електродах, а й транспортувати їх за заданою траєкторією у зони накопичення і вивантаження, маніпулюючи частинками за відмінністю їх електрофізичних властивостей.

2. Встановлено, що максимальна ефективність процесів очищення і сепарації слабопровідних суспензій у біжучому електричному полі відбувається за максимальної сили, яка діє на поляризовані частинки суспензії, що забезпечується частотою поля, яка однозначно визначається електрофізичними властивостями рідини та частинок домішок. Зокрема, ефективне очищення соняшникової олії з

діелектричною проникністю $3,2 \cdot 10^{-11}$ і питомою електропровідністю $5 \cdot 10^{-9}$ См/м

від нежирових домішок з діелектричною проникністю $4,9 \cdot 10^{-11}$ і питомою

електропровідністю $8,2 \cdot 10^{-8}$ См/м відбувається за кутової частоті 814 рад/с.

3. Отримано теоретичну формулу для визначення сили, яка діє на поляризовану частинку в електричному полі через функцію комплексного потенціалу і на її підставі побудовано аналітичну модель поля сил у системі багатофазних дворядних плоских електродів, що надало можливість на основі теоретичних досліджень динаміки руху частинок визначити конструктивні та технологічні параметри пристроїв очищення і сепарації слабопровідних суспензій.

4. Отримано теоретичну формулу для визначення моменту сили, яка діє на поляризовану частинку в електричному полі через функцію комплексного потенціалу і побудовано аналітичну модель поля моментів сил в системі багатофазних електродів у вигляді гіперболічних циліндрів. Встановлено, що для

визначення діелектричної проникності та питомої електропровідності рідини і частинок домішок доцільно використовувати чотирифазну систему електродів,

яка створює однорідне поле моментів в центрі області величиною 1,6 Н·м при

розмірах області $h = 1$ м, діючій напрузі на електродах – 1 В, параметрі суспензії

$$A = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}^3 / \text{В}^2.$$

5. Обґрунтовано доцільність застосування методу зустрічних моментів, який дозволяє визначати діелектричну проникність і питому електропровідність частинок з відносними похибками відповідно 0,4% та 0,8% без їх вилучення з рідини, що дає змогу встановлювати частоту електричного поля для ефективного очищення і сепарації.

6. Обґрунтовано співвідношення геометричних параметрів багатофазних електродних систем і електричних схем подачі напруги. Встановлено, що для забезпечення максимальної середньої сили в системах багатофазних електродів пристроїв очищення суспензій, в яких використовуються чарунки-накопичувачі, потрібно застосовувати схему без зсуву фаз між протилежними електродами при співвідношенні розмірів міжелектродної області: для двофазних та трифазних

систем – $0,2 < l/h < 0,7$; для чотирифазних систем – $0,3 < l/h < 0,7$. Для сепараторів

та очищувачів з біжучим полем співвідношення розмірів повинно складати: для

трифазних систем – $0,2 < l/h < 0,4$; для чотирифазних – $0,2 < l/h < 0,6$.

7. Встановлено закономірності протікання процесів очищення і сепарації в електричному полі багатоелектродних систем. Теоретично доведено і експериментально підтверджено, що зменшення розмірів міжелектродної області призводить до збільшення сили дії пульсуючого поля обернено пропорційно другій степені розміру, а біжучого поля – першій степені (при незмінній напруженості поля), що дозволяє підвищити ефективність процесів очищення і сепарації.

8. Встановлено, що використання двох зустрічно біжучих електричних полів забезпечує розділення частинок дисперсної фази з різними електрофізичними властивостями, зокрема, дві частинки радіусом 50 мкм, діелектричні проникності

яких: $\varepsilon_{ч1} = 2,1 \cdot 10^{-11}$ Ф/м; $\varepsilon_{ч2} = 2,9 \cdot 10^{-11}$ Ф/м, питомі електропровідності: $\sigma_{ч1} = 10^{-7}$

См/м; $\sigma_{ч2} = 4 \cdot 10^{-8}$ См/м, які знаходяться в соняшниковій олії, при подачі на

електродну систему з параметрами: $h = 2$ мм; $l/h = 0,5$ двох систем чотирифазних напруг з кутовими частотами: $\omega_1 = 300$ рад/с; $\omega_2 = 2000$ рад/с і напругами $U_1 = U_2 = 2$ кВ, за 100 с розійдуться на відстань 110 мм і будуть розділені за ознаками електрофізичних властивостей.

9. Експериментально встановлено, що біжуче електричне поле забезпечує ступінь очищення соняшникової олії від нежирових домішок на рівні 98% при

залишковому вмісті 0,02% за питомих енерговитрат $0,152$ кВт·год/м³, що

зумовлює переваги над базою порівняння прес-фільтром ФПР-16, питомі витрати у

якого $1,72$ кВт·год/м³ за залишкового вмісту нежирових домішок 0,03%. При цьому

сепарація нежирових домішок і гідратованих фосфатидів у чотирифазній системі циліндричних електродів, що створюють два зустрічно біжучих електричних поля з кутовою частотою 1000 та 4500 рад/с, забезпечує коефіцієнт розділення гідратованих фосфатидів на рівні 67%, а нежирових домішок на рівні 90% за 300 с.

10. Отримано залежності геометричного коефіцієнта та коефіцієнта енерговитрат трифазних та чотирифазних багаторядних систем циліндричних електродів від геометричних параметрів системи електродів, які дозволили встановити межі співвідношень розмірів міжелектродної області, що є найбільш

енергетично вигідними ($0,3 < l/h < 0,5$), які вміщуються в межі інтервалів

максимальної приведеної сили.

11. Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків та рекомендацій базуються на використанні положень електродинаміки суцільних середовищ, теорії поля, гідродинаміки та математичної фізики, узгодженості

теоретичних положень з експериментальними даними та їх практичною апробацією. Результати експериментальних досліджень у вигляді графічних залежностей ступеня очищення та коефіцієнту розділення дисперсної фази суспензії підтвердили теоретичні положення щодо впливу геометричних параметрів електродних систем та систем напруг на динаміку поведінки частинок дисперсної фази в електричному полі.

12. На підставі проведених досліджень розроблено і досліджено в лабораторних та виробничих умовах електротехнологічний комплекс очищення соняшникової олії, який забезпечує ефективне очищення за частоти від 40 до 1000 Гц і фазній напрузі до 6 кВ при продуктивності 0,1 м³/год і залишковому вмісті нежирових домішок 0,02%. Впровадження комплексу дозволить отримати чистий дисконтований дохід 44000 грн за річного обсягу випуску соняшникової олії 1500 м³.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях

1. Яковлев В. Ф. Интенсификация очистки растительных масел ультразвуком / В. Ф. Яковлев, И. П. Назаренко, О. М. Орел // Труды Таврической государственной агротехнической академии: тем. науч.-техн. сборник. – Мелитополь: ТДАТА, 1998. – Вып. 1, т. 6. – С. 67–70 (автору принадлежит идея и разработка методики экспериментальных исследований).

2. Назаренко И. П. Очистка минеральных масел напорной флотацией с наложением электростатического поля / И. П. Назаренко, О. М. Орел, Ю. О. Стыопин // Труды Таврической государственной агротехнической академии: темат. науч.-техн. сборник. – Мелитополь: ТДАТА, 1998. – Вып. 1, т. 8. – С. 55–58 (автору принадлежит идея интенсификации флотационного очищения электрическим полем).

3. Назаренко И. П. Интенсификация флотационной очистки соняшникового масла электростатическим полем / И. П. Назаренко, В. Ф. Яковлев, О. Г. Кондратенко // Работы Таврической государственной агротехнической академии: наук. фак. издания. – Мелитополь: ТДАТА, 2001. – Вып. 1, т. 21. – С. 49–53 (автору принадлежит идея работы и изложение основного материала).

4. Назаренко И. П. Исследования процесса зарядки дисперсной фазы в диэлектрических средах / И. П. Назаренко // Работы Таврической государственной агротехнической академии: наук. фак. издания. – Мелитополь: ТДАТА, 2002. – Вып. 9. – С. 33–37.

5. Гулевский В. Б. К вопросу коагуляции частиц в электрическом поле / В. Б. Гулевский, И. П. Назаренко, В. И. Просвирнин // Работы Таврической государственной агротехнической академии: наук. фак. издания. – Мелитополь: ТДАТА, 2004. – Вып. 19. – С. 50–55 (автору принадлежит информационно-аналитическое обеспечение работы).

6. Назаренко И. П. Эффективность использования электростатического поля в процессе дезодорации растительных масел / И. П. Назаренко, М. В. Чугреева // Работы Таврической государственной агротехнической академии: наук. фак.

видання. – Мелітополь: ТДАТА, 2005. – Вип. 33. – С. 49–54 (*автору належить ідея застосування електричного поля для дезодорації рослинних олій*).

7. Назаренко І. П. Вплив електростатичного поля на процес випаровування летючих речовин / І. П. Назаренко, М. В. Ковальчук // *Праці Таврійської державної агротехнічної академії: наук. фах. видання.* – Мелітополь: ТДАТА, 2006. – Вип. 38. – С. 65–71 (*автору належить ідея і розробка методики експериментальних досліджень*).

8. Назаренко І. П. До питання випаровування рідин в коронному розряді / І. П. Назаренко, О. І. Лобода, М. О. Груба, К. М. Ларіков // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання.* – Мелітополь: ТДАТУ, 2008. – Вип. 8, т.5. – С. 44–48 (*автором запропоновано застосування коронного розряду для інтенсифікації випаровування рідин та розроблена методика експериментальних досліджень*).

9. Назаренко І. П. Електрична очистка діелектричних рідин / І. П. Назаренко, С. В. Петриченко // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання.* – Мелітополь: ТДАТУ, 2008. – Вип. 8, т. 7. – С. 68–73 (*автором запропонована класифікація способів електричного очищення рідин, розроблена методика дослідження та електродні системи експериментальних установок*).

10. Назаренко І. П. Очистка діелектричних рідин в електричному полі / І. П. Назаренко // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка: наук. фах. видання.* – Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2009. – Вип. 87: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – С. 153–155.

11. Назаренко І. П. Теоретичні дослідження енергетичних показників камерного електросепаратора / І. П. Назаренко, М. О. Рубцов // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання.* – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. – Вип. 9, т. 2. – С. 140–147 (*автору належить ідея роботи та виклад основної частини матеріалу статті*).

12. Яковлев В. Ф. Очистка соняшникової олії в неоднорідному електричному полі / В. Ф. Яковлев, В. О. Мунтян, І. П. Назаренко // *Вісник Львівського національного аграрного університету: зб. наук. праць.* – Львів: Львівський НАУ, 2009. – С. 20–25. – (Агроінженерні дослідження) (*автору належить аналіз рівняння руху частинки в електричному полі та розробка методики експериментальної перевірки теоретичної моделі*).

13. Назаренко І. П. Очистка діелектричних рідин в електричному полі / І. П. Назаренко, Л. С. Червінський // *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України.* – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2009. – Вип. 139. – С. 97–103 (*автору належить ідея і теоретичне обґрунтування застосування біжучого електричного поля для очищення діелектричних рідин та методика визначення моменту сили в обертовому електричному полі*).

14. Назаренко І. П. Моделювання біжучого електричного поля в електросепараторах діелектричних суспензій / І. П. Назаренко // *Вісник*

Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. – Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 101: Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – С. 137–139.

15. Назаренко І. П. Сепарація діелектричних суспензій у біжучому електричному полі / І. П. Назаренко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2010. – Вип. 148: Техніка та енергетика АПК. – С. 117–123.

16. Назаренко І. П. Моделювання електричного поля багатоелектродних систем пристроїв електричної очистки та сепарації діелектричних суспензій / І. П. Назаренко, В. Ф. Яковлев, О. І. Лобода, С. В. Петриченко // Вісник Сумського національного аграрного університету. – Суми: СНАУ, 2012. – Вип. 3(23): Механізація та автоматизація виробничих процесів. – С. 117–122 (*автору належить інформаційно-аналітичне забезпечення роботи та розрахунки характеристик поля в програмі MATLAB*).

17. Назаренко І. П. Дослідження джерела живлення для пристроїв електричного очищення слабопровідних суспензій [Електронний ресурс] / І. П. Назаренко. – Електрон. текстові дані. – on-line // Енергетика і автоматика: електрон. наукове фах. видання / Національний університет біоресурсів і природокористування України. – Київ, 2014. – №2 (20). – С. 11–17. – Систем. вимоги.: ADOBE ACROBAT READERE ; INTERNET. – Режим доступу: <http://www.nbuu.gov.ua/e-journals>. – Загл. с тит. екрана.

Статті в міжнародних виданнях

18. Назаренко І. П. Сепарація слабопровідних суспензій в бегущем электрическом поле / Назаренко І. П. // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. – Княгинино: НГИЭИ, 2013. – Вип. 10(29): Серия технические науки. – С. 93–100.

19. Назаренко І. П. Электроочистка слабопровідних суспензій / І. П. Назаренко // Известия Международной академии аграрного образования. – СПб: СПбГАУ, 2013. – Вип. 19 (2013). – С. 81–84.

20. Берека О. Н. Электротехнологический комплекс электросепарации подсолнечного масла в бегущем электрическом поле / О. Н. Берека, І. П. Назаренко // Вестник ВИЭСХ. – М.: ВИЭСХ, 2014. – Вип. 1 (14). – С. 10–14 (*автору належить теоретичне обґрунтування та розробка елементів електротехнологічного комплексу електросепарації соняшникової олії*).

21. Назаренко І. П. Сепарація слабопровідних суспензій в бегущем электрическом поле / І. П. Назаренко // Вестник аграрной науки Дона. – Зерноград, 2013. – №3 (23). – С. 77–84.

22. Назаренко І. П. Очистка и сепарация подсолнечного масла в бегущем электрическом поле / І. П. Назаренко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков: Технологический центр, 2014. – Вип. 5 №11 (71). – С. 9–13.

Патенти

23. Пат. 94810 Україна, МПК В 01D35/6. Спосіб електричної очистки діелектричних рідин / І. П. Назаренко, В. А. Дідур (Україна). – №а 200911592; заявл. 13.11.2009 ; опубл. 10.06.2011, Бюл. №11. Заявник: Назаренко Ігор Петрович, UA, Дідур Володимир Аксентійович. Власник: Таврійський державний агротехнологічний університет *(автору належить ідея та обґрунтування частоти електричного поля)*.

Статті в інших виданнях

24. Назаренко І. П. Обґрунтування частоти біжучого електричного поля в пристроях очистки діелектричних рідин / І. П. Назаренко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – Вип. 10, т. 3. – С. 171–175.

25. Назаренко І. П. Визначення електрофізичних властивостей діелектричних суспензій / І. П. Назаренко, М. О. Рубцов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання.– Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип. 11, т. 3. – С. 167–175 *(автору належить ідея, теоретичне обґрунтування та розробка методика визначення електрофізичних властивостей діелектричних суспензій з застосуванням обертового електричного поля)*.

26. Назаренко І. П. Джерело живлення для пристроїв електричної очистки діелектричних рідин [Електронний ресурс] / І. П. Назаренко, О. І. Лобода, О. П. Гомонець. – Електрон. текстові дані. – on-line // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електрон. наукове фах. видання / ТДАТУ. – Мелітополь, 2011. – Вип. 1, т. 1. – Систем. вимоги.: ADOBE ACROBAT READERE; INTERNET. – Режим доступу: http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/nvtdau/2011_1/index.html. – Загл. с тит. екрана *(автору належить ідея роботи та викладення основного матеріалу статті)*.

27. Назаренко І. П. Теоретичні дослідження взаємодії електричного поля з діелектричними суспензіями в багатоелектродних системах / І. П. Назаренко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання. – Мелітополь: ТДАТУ, 2012. – Вип. 12, т. 1. – С. 35–45.

28. Назаренко І. П. Теоретичне обґрунтування геометричних параметрів багатофазних електродних систем електросепараторів слабопровідних суспензій / І. П. Назаренко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – Вип. 13, т. 2. – С. 75–82.

29. Назаренко І. П. Дослідження енергетичних показників електродних систем електросепараторів / І. П. Назаренко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання.– Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – Вип. 13, т. 5. – С. 112–118.

Матеріали міжнародних конференцій

30. Назаренко І. П. Моделювання електричного поля, що обертається в електросепараторах діелектричних суспензій / І. П. Назаренко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – Вип. 10, т. 8: Матеріали міжнародної науково-

практичної конференції «Моделювання технологічних процесів в АПК» – С. 338–345.

31. Назаренко І. П. До питання визначення електрофізичних властивостей діелектричних суспензій / І. П. Назаренко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: наук. фах. видання. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – Вип. 11, т. 4: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні питання енергетики і прикладної біофізики в агровиробництві». – С. 167–175.

32. Назаренко И. П. Очистка и сепарация слабопроводящих суспензий в бегущем электрическом поле / И. П. Назаренко // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 16–17 окт. 2013 г.). В 3 т. Т. 3. / РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редколлегия: П. П. Казакевич (гл. ред.), С. Н. Поникарчик. – Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2014. – С. 51–58.

33. Яковлев В. Ф. Электрическая очистка и сепарация суспензий / В. Ф. Яковлев, И. П. Назаренко, А. И. Лобода, С. В. Петриченко, А. В. Литвин. Современные проблемы инновационного развития агроинженерии: материалы международной научно-производственной конференции. (Белгород, 20 – 21 ноября 2012 г.). В 2 частях. Часть 1 / Белгородская государственная сельскохозяйственная академия им. В. Я. Горина. – п. Майский: Изд-во БелГСХА им. В. Я. Горина, 2012. С. 200–204 (*автору належить теоретичне обґрунтування та розрахунки характеристик поля в програмі MATLAB*).

АНОТАЦІЯ

Назаренко І. П. Електротехнологічний комплекс очищення і сепарації слабопровідних суспензій в електричному полі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2015.

Дисертація присвячена розв'язанню науково-прикладної проблеми, яка полягає в розробці науково-технічних основ створення і застосування електротехнологічних комплексів очищення та сепарації слабопровідних суспензій у змінному електричному полі високої напруженості.

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження дозволили започаткувати новий напрямок – використання біжучого електричного поля в пристроях очищення та сепарації слабопровідних суспензій.

Розроблено математичні моделі електричного поля, поля сили та моменту сили багатофазних систем електродів. На підставі цих моделей обґрунтовано конструктивні параметри технічних засобів очищення і сепарації та розроблено методи визначення електрофізичних властивостей слабопровідних суспензій в обертовому електричному полі.

Теоретично та експериментально досліджено процеси очищення і сепарації слабопровідних суспензій у пульсуючому та біжучому електричних полях.

Розроблено і досліджено в лабораторних і виробничих умовах електротехнологічний комплекс очищення і сепарації соняшникової олії в електричному полі.

Ключові слова: електричне поле, електрод, очищення, сепарація, слабопровідна суспензія, електрофізичні властивості.

АННОТАЦІЯ

Назаренко И. П. Электротехнологический комплекс очистки и сепарации слабопроводящих суспензий в электрическом поле. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2015.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы разработки научно-технических основ создания и применения электротехнологических комплексов очистки и сепарации слабопроводящих суспензий в переменном электрическом поле высокой напряженности, которое позволит обеспечить высокоэффективную очистку и сепарацию слабопроводящих суспензий по признакам электрофизических свойств.

В работе рассмотрены современные методы очистки и сепарации жидкостей, проанализированы особенности электродных систем аппаратов очистки в электрическом поле, рассмотрены источники питания для устройств очистки и методы определения электрофизических свойств суспензий.

Проведен теоретический анализ взаимодействия электрического поля со слабопроводящими суспензиями и определена приоритетность сил, которые действуют на дисперсную фазу. Выявлено влияние электрофизических характеристик суспензии и частоты поля на эти силы.

Разработаны и исследованы математические модели электрического поля, поля сил и моментов для многофазных электродных систем. Получена теоретическая формула для расчета силы, которая действует на поляризуемую частицу в электрическом поле, через функцию комплексного потенциала, и на ее основании разработана аналитическая модель поля сил в системе многофазных двурядных плоских электродов, что позволило теоретически исследовать процессы очистки и сепарации суспензии.

Теоретически обоснованы, разработаны и исследованы методы определения электрофизических свойств слабопроводящих суспензий по результатам косвенных совокупных измерений. Получена теоретическая формула для расчета момента силы, которая действует на поляризуемую частицу в электрическом поле, через функцию комплексного потенциала и на ее основании разработана аналитическая модель поля моментов сил в системе многофазных электродов в виде гиперболических цилиндров. Разработан метод встречных моментов, позволяющий определять электрофизические свойства дисперсных частиц суспензии (диэлектрическую проницаемость и удельную электропроводность) непосредственно в жидкой дисперсионной среде. Определение этих показателей

дало возможность рассчитать частоту поля, при которой обеспечивается эффективная очистка суспензии.

Теоретически обоснованы геометрические параметры многоэлектродных систем устройств очистки и сепарации суспензий, которые соответствуют максимальной средней силе, действующей на частицу дисперсной фазы суспензии, и обеспечивают максимальную степень очистки и коэффициент разделения при сепарации.

Разработаны и исследованы математические модели процесса очистки и сепарации слабопроводящих суспензий в виде дифференциальных уравнений движения частиц суспензии. Определено влияние параметров поля и суспензии на эффективность процессов очистки и сепарации.

Экспериментально исследованы процессы очистки и сепарации слабопроводящих суспензий в электрическом поле, а также исследованы энергетические показатели многоэлектродных систем. Исследования проводились на суспензиях частиц подсолнечного шрота разной влажности в рафинированном подсолнечном масле. Результаты экспериментальных исследований подтвердили достоверность теоретических моделей процессов очистки и сепарации. Кроме того, экспериментально исследованы процессы очистки и сепарации нефилтрованного подсолнечного масла.

Установлены зависимости геометрического коэффициента трех- и четырехфазных многорядных систем цилиндрических электродов, который определяет их электропроводность, от геометрических параметров системы электродов, что позволило определить энергетические показатели электродных систем устройств очистки и сепарации.

Разработаны и исследованы технические средства электротехнологического комплекса очистки и сепарации слабопроводящих суспензий в электрическом поле.

Ключевые слова: электрическое поле, электрод, очистка, сепарация, слабопроводящая суспензия, электрофизические свойства.

ABSTRACT

I. Nazarenko. Electrotechnological complex of purification and separation of weakly conducting suspensions in an electric field. – A manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2015.

The thesis is an attempt to solve a scientific and applied problem, which is to develop the scientific and technical bases of creation and application of electrotechnological complexes of purification and separation of weakly conducting suspensions in an alternating electric field of high intensity.

Theoretical and experimental studies were carried out. They allowed starting a new trend – the use of travelling electric field in the devices for separation and purification of weakly conducting suspensions.

The mathematical models of electric field, force field and moment of force in multiphase systems electrodes were developed. The design parameters of technical means for purification and separation based on these models were proved and the methods for determination of electrophysical properties of weakly conducting suspensions in a rotating electric field were developed.

The process of purification and separation of weakly conducting suspensions in pulsed and electric travelling field was theoretically and experimentally studied. The electrotechnical complex of purification and separation of sunflower oil in an electric field in laboratory and industrial conditions was developed and investigated.

Keywords: electric field, electrode, purification, separation, weakly conducting suspension, electrophysical properties.