

УДК 537.84:533.3:538. 4

Остапенко А.О., канд. фіз.-мат. наук, доцент,
Журавльов М.О., магістр,
Курнат Н.Л., магістр
(ДВНЗ «НГУ»)

ВПЛИВ РОЗМІРІВ І ТЕМПЕРАТУРИ АКТИВНОГО ЕЛЕКТРОДУ НА КІНЕМАТИКУ ЕЛЕКТРОГІДРОДИНАМІЧНИХ (ЕГД) ТЕЧІЙ

Остапенко А.А., канд. физ.-мат. наук, доцент,
Журавлев М.А., магистр,
Курнат Н.Л., магистр
(ГВУЗ «НГУ»)

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ АКТИВНОГО ЭЛЕКТРОДА НА КИНЕМАТИКУ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ (ЭГД) ТЕЧЕНИЙ

Ostapenko A.O., Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor
Zhuravlyov M.A., M.S (Tech.)
Kurnat N.L., M.S (Tech.)
(SHEI «NMU»)

EFFECT OF ACTIVE ELECTRODE SIZE AND TEMPERATURE ON THE KINEMATICS OF ELECTROHYDRADYNAMIC (EHD) FLOWS

Анотація. Існує декілька робочих моделей утворення ЕГД-течії. У всіх випадках причиною ЕГД-течії є некомпенсований (надмірний) електричний заряд. Для його утворення потрібен активний електрод-концентратор. Але відомо, що ЕГД-течії існують і в однорідних електричних полях. Метою даного дослідження було оцінити вплив різних форм електродів на ЕГД-течії. Були зроблені аналіз та класифікація ЕГД течій у різних електродних системах. Були описані зони й іон-молекулярні структурна одиниця. Існує три зони головного потоку ЕГД-течії – зона прискорення, зона сталої швидкості й зона гальмування. ЕГД-течії у різних електродних системах східні. ТЕГД модель не описує появу об'ємного заряду. Експерименти показали, що температурний градієнт у зоні активного електроду відсутній, а ЕГД-течії існують до замерзання рідини.

Ключові слова: заряд, ЕГД-течія, кінематика рідини, надмірний заряд, діелектрики. іон-молекулярні структури, активний електрод, зони центрального потоку. зони прискорення зона гальмування, подібні течії.

У літературі викладені декілька робочих теорій, що претендують на опис процесів формування електрогідродинамічних течій [1-2]. Необхідною умовою, що призводить кінець кінцем до появи об'ємного заряду, є наявність активного електроду-концентратору струму провідності або напруженості електричного поля. В той же час добре відомо, що ЕГД-течії реалізуються і в системі плоскопаралельних електродів, коли електрод-концентратор відсутній.

Існує тенденція розділення ЕГД течій на класи залежно від ефективності електроду-концентратора.

Велика група робіт присвячена дослідженню завдань термо ЕГД (ТЕГД). Так, у зоні різкої геометричної неоднорідності електричного поля, яке залежить від розміру електроду. При малих розмірах електроду в близькій до нього зоні рідини повинна зростати густина приповерхневого струму. Виникає температурний градієнт, який і обумовлює виникнення об'ємного заряду, що приводить до виникнення ЕГД-течії. Проте питання про відносну роль ізотермічного і ТЕГД механізмів електризації залишається відкритим [3,4]. Роль останнього краще всього оцінити, досліджуючи електроконвекцію від охолоджуваного активного електроду, аж до створення протилежних градієнтів температур. Якщо теплова гіпотеза вірна, то при цьому електричний вітер повинен зникнути при зрівнянні зустрічних температурних градієнтів [2,5]. Розглянемо основні риси ЕГД-течії на прикладі течій в системі електродів провід над площиною. Відомо, що ЕГД-течії носять пороговий характер [2]. Порогова напруга залежить від рідини, матеріалу й покриття електродів, а також домішкового складу рідини й лежить у границях 0,2-2 кВ.

У роботі [2] розглянуто два режими ЕГД-течії: розвинутої й не розвинутої течії. Нерозвинена течія локалізована у зоні активного електроду (у нашому випадку – в зоні проводу), розвинена течія доходить до площинного електроду.

Слідє підкреслити, що картина візуалізованих ліній потоку розвинутої ЕГД-течії у різних умовах дуже схожі, а виявлені відрізнення торкаються, в основному, кінематичних й динамічних характеристик течії. З картини візуалізації течій з допомогою малих повітряних кульок видно, що течії носять ламінарний характер, течія направлена від активного електроду до площинного. Взагалі всю область ЕГД течії можна розділити на декілька зон. У безпосередній близькій зоні біля активного електроду існує тонкий нерухомий шар рідини ("приліплений"). Цей шар має характерний розмір у десяті долі міліметра і його можна побачити на фото ЕГД-течії. В межах цієї зони й відбувається введення заряду з поверхні електроду в рідину. Далі лежить зона інтенсивного прискорення рідини електричним полем, у межах цієї зони відбувається перетворення електричної енергії у кінетичну. Далі йде зона повільно змінної течії. Цю зону названо центральним потоком ЕГД-течії, яка співвідносна ламінарній зоні течії. У межах цієї зони прискорення незначні. Далі існує зона гальмування центрального потоку ЕГД-течії (приповерхнева зона площинного електроду). Безпосередньо до поверхні електроду прилягає нерухомий шар рідини. В цій зоні відбувається різкий спад модуля швидкості. (тут потік розділяється змінює напрям). Таким чином, аналіз зонної структури течії показує: іон, який отримав електричний заряд на поверхні активного електроду, в межах нерухомої зони рухається відносно рідини зі швидкістю, яка визначається низьковольтною рухомістю іону. Навколо іону створюється якась молекулярна структура (кластер), яка забезпечує надалі збільшену взаємодію з молекулярним оточенням.

Далі іон прискорює рідину (в межах зони прискорення). Величина середньої електрогідродинамічної рухомості Re_{el} визначається як відношення середньої швидкості рідини v до середньої швидкості іонів відносно рідини vE в центральній зоні ЕГД-течії й має значення 10-20, тобто поза зоною прискорення іони практично “вморожені” в рідину [3]. Приєднану масу окремого іона можна визначити, прирівнюючи в зоні прискорення сили інерції – електричним силам: $\rho E \sim \gamma \frac{dv}{dt}$, тут ρ , E , γ , v – відповідно об’ємний заряд, напруженість електричного поля, густина рідини й швидкість ЕГД-течії.

Відношення $\gamma \rho / \gamma \sim E^{-1} \frac{dv}{dt}$ можна оцінити, користуючись даними [1].

Середнє прискорення в межах цієї зони лежить в діапазоні 1-10 м/с², середня напруженість електричного поля 10⁶ В/м, густина рідини 8·10² кг/м³. Відношення ρ/γ у центральній зоні дорівнює 10⁻⁵ К/кг, що відповідає приєднаній масі у 0,2-5·10⁻¹⁴ у розрахунку на однозарядний іон. Маса молекул вуглеводневих олій лежить в межах 3-5·10⁻²⁵ кг. Таким чином в зоні прискорення кожний іон досить жорстко зв’язаний з далеким сольватним оточенням, яке має 0,5-5·10¹⁰ молекул рідини. (У роботі [7] ці структурні створення були зафіксовані методами акустичної дисперсії). Посилене іон-молекулярна взаємодія приводить до досить високому коефіцієнту перетворення електричної енергії в кінетичну.

Справжня робота торкається експериментального дослідження кінематики ЕГД течій від електродів різних форм і розмірів, а також від охолоджуваного електроду. Метою роботи є оцінки міри впливу неоднорідності електричного поля, обумовленого геометричними причинами, на інтенсивність ЕГД течій і міри проти направленою для виникнення ЕГД-течії впливу ТЕГД ефектів, викликаних глибоким охолодженням активного електроду, на інтенсивність ЕГД течій.

Дослідження проводилося методом фотографування світлорозсіювальних міток - дрібних повітряних бульбашок, введених в центральний струмінь ЕГД течій. Застосування бічного імпульсного підсвічування дозволяло вимірювати поле швидкостей ЕГД течій. Розміри повітряних кульок використовувалися такими, щоб їх рух відносно рідини не вносив помилки у оцінку руху середовища, тобто вони були б “вморожені у рідину”. У попередніх експериментах визначалися розміри цих кульок їх концентрація в рідині виходячи з вимоги незмінності початкової провідності діелектрика.

Дослідження проводилося для електродів типу циліндр-площина і куля-площина. У роботі використовувалися наступні електроди: сталеві кулі $d = 1,5$ і $3,0$ мм; платиновий дріт $d = 3 \cdot 10^{-4}$ см; мідний дріт $d = 5 \cdot 10^{-2}$; 0,5; 1,3 і 4,0 мм; латунний стрижень $d = 2,0$ см; різальна частина леза бритви (сталь) завтовшки 0,03 мм. Широкий набір електродів дозволив варіювати приелектродну напруженість електричного поля [1], розраховану в електростатичному наближенні, густину струму провідності в межах трьох порядків.

Дослідження по впливу глибокого охолодження електроду на кінематику ЕГД течій приведені для системи електродів куля $d = 0,6$ см – площина (між

електродна відстань 3 см) в трансформаторному маслі. Кульовий електрод охолоджувався через мідний стрижень, опущений одним кінцем в посудину з рідким азотом. Температура поверхні кульового електроду і рідини контролювалася двома спеціальними термопарами, що дозволяли контролювати температуру з точністю до 10^{-2} С і дозволяли фіксувати її градієнти. Дослідження поля швидкостей течій від різних циліндричних електродів показали, що течії геометрично подібні [3]. Характерний розмір течії (відстань між центрами завихрень) практично не залежить від розмірів і форми електродів. Профілі швидкостей, а також осьові розподіли швидкості течій також не залежать від розмірів активного електроду. На рисунку 1 приведені залежності електричного числа Рейнольдса від напруги для різних електродів. Експериментальні точки задовільно апроксимуються кусочно-ламаною прямою, що перетинає вісь абсцис в точках, що відповідають порогу виникнення ЕГД течій. Характер залежностей $Re_{el} = Re_{el}(U)$ для різних електродів ідентичний. Спостерігається деяке зростання порогової напруги при збільшенні діаметру активного електроду. Відрізки прямих на графіку по кожному з електродів характеризують різні режими ЕГД течій: початковий крутий відрізок – режим нерозвиненого, кінцевий, більш пологий, – режим розвиненої ЕГД течії.

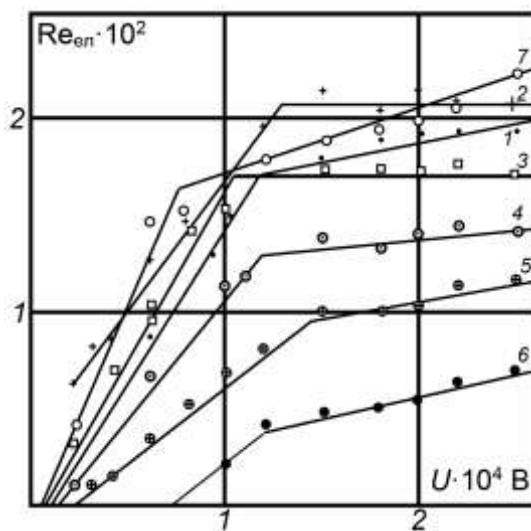


Рисунок 1 - Залежність електричного числа Рейнольдса від напруги для різних електродів: 1 - платиновий дріт $d = 3$ мк; 2 - мідний дріт $d = 0,05$ мм; 3 - $d = 0,5$ мм; 4 - $d = 1,3$ мм; 5 - мідний циліндр $d = 4$ мм; 6 - мідний напівциліндр $d = 20$ мм; 7 – лезо (сталь) завтовшки 0,08 мм.

На рисунку 2 в напівлогарифмічному масштабі наведена залежність максимальної швидкості в центральному струмені течії від радіусу активного електроду, перерахована до безрозмірних координат. Видно, що залежність дуже слабка, а починаючи з деякого критичного значення $d = 1$ мм, швидкість ЕГД течії не залежить від розмірів електроду. Таким чином, виявилось, що ЕГД течії як в сильнеоднорідних, так і в слабконеоднорідних електричних полях практично ідентичні. Вплив міри концентрації поля (струму провідності), обумовленої чисто геометричними чинниками, мале i , мабуть, не є головною

причиною електризації середовища. Тут слід віддати перевагу приелектродним концентраційно-дифузійним процесам електролітичної природи [4-6].

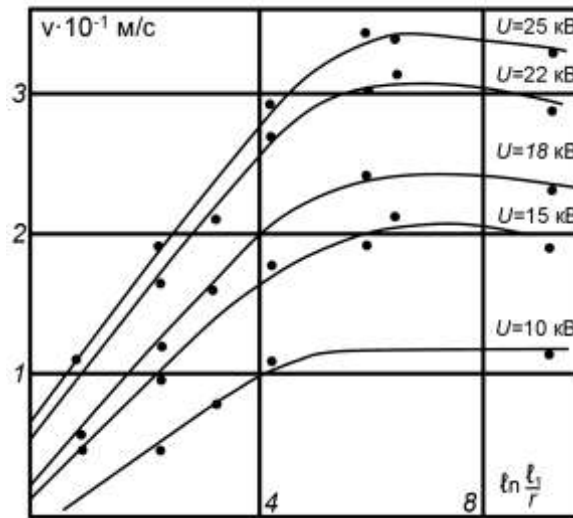


Рисунок 2 - Залежність максимальної швидкості в центральному струмені ЕГД течії від логарифма радіусу активного електроду, перерахованого до безрозмірних координат

На рисунку 3 наведено ескізи ЕГД процесів в трансформаторному маслі при глибокому охолодженні кульового електроду при різниці потенціалів 25 кВ. Лівий малюнок відповідає випадку, коли приелектродні шари рідини ще не "замерзли" – течія є, правий демонструє утворення замерзлої кірочки масла біля електроду. Графік відбиває залежність швидкості ЕГД течій від перепаду (градієнта) температур між поверхнею електроду і рідиною. Точки в межах точності $\pm 20\%$ від вимірюваної величини укладаються на пряму, паралельну осі абсцис. З початком утворення кірочки замерзлої рідини у поверхні електроду швидкість ЕГД течії різко падає, аж до повної зупинки рідини (пунктирна пряма). Деякий розкид точок пояснюється тимчасовою флуктуацією, швидкості ЕГД течії, характерній і для ізотермічних умов.

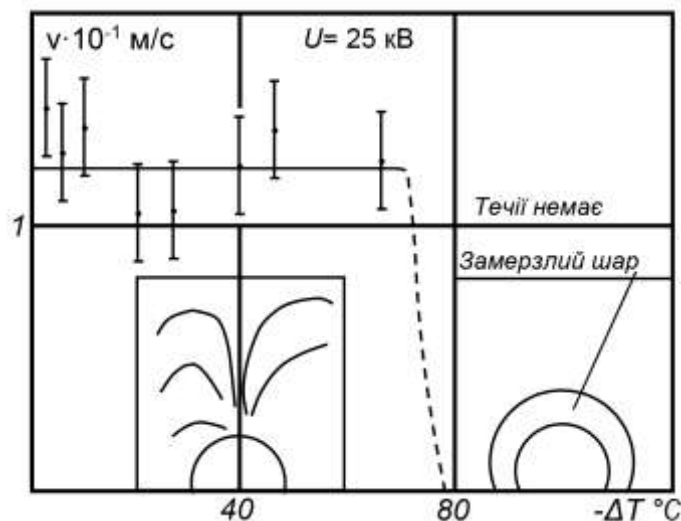


Рисунок 3 - Ескізи ЕГД процесів в трансформаторному маслі при глибокому охолодженні кульового електроду; $U = 25$ кВ.

Таким чином, встановлено, що інтенсивність ЕГД течій при глибокому охолодженні електроду практично не залежить від перепаду (градієнту) температур в приелектродному шарі аж до замерзання останнього. Це дозволяє зробити висновок, що ТЕГД ефекти грають другорядну роль і не є головною причиною ЕГД процесів в середовищі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стишков, Ю.К. Формирование электрогидродинамических течений в сильно неоднородных электрических полях при двух механизмах зарядообразования / Ю.К. Стишков, В.А. Чирков // ЖТФ. - 2012. - т. 82. - с.3-13.
2. Стишков, Ю.К. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках / Ю.К. Стишков, А.А. Остапенко. – Ленинград: Издательство Ленгосуниверситета, 1989.
3. Ostapenko, A.A. Some questions of formation charges drops of stressed dielectric liquids / A.A. Ostapenko // Ann. "Phys liquid dielectrics." – Austin: Univer.Puss, 2010.– p.1010-1031.
4. Остапенко, А.А. О диффузии углеводородов в дисперсной системе в электрическом поле / А.А. Остапенко // Проблемы природокористування та сталого розвитку регіонів: Матеріали V міжнародної конференції - Дніпропетровськ, 2009. – с.141-144.
5. Остапенко, А.А. ЭГД-течения как средство теплообмена в усдовмях крайних температур / А.А. Остапенко // Проблемы природокористування та сталого розвитку й техногенної безпеки регіонів: Матеріали IV міжнародної конференції / Дніпропетровськ, 2007. - т. 2. – с.66-70.
6. Роль термодинамических параметров вещества в задачах диспергирования / А.И. Лютий, Л.Н. Глушко, А.А. Остапенко, Л.Ж. Горобец // Материалы Конгресса обогатителей стран СНГ. - 2011. - т.1. – с.337-34.
7. Stishkov, Y.K. Breakdown of the homogeneity of weakly conducting liquids in high electric fields / Y.K. Stishkov, A.V. Steblyanko // Zh.Tekh. Fiz. – 2011 – Т. 67 – pp.105-111.

REFERENCES

1. Stishkov, Y.K. and Chirkov, V.A. (2012), "Formation the elektrogidrodinamicheskikh of currents in strongly inhomogeneous electric fields at two mechanisms of a zaryadoobrazovaniye", *Zh. Tekh. Fiz.*, vol. 82, pp. 3-13.
2. Stishkov, Y.K. and Ostapenko, A.A. (1989), *Elektrogidrodinamicheskie techeniya v zhidkikh dielektrikakh* [Electrohydrodynamic currents in fluid dielectrics], Izdatelstvo Lengosuniversiteta, Leningrad, SU.
3. Ostapenko, A.A. (2010), "Some questions of formation charges drops of stressed dielectric liquids", *Phys liquid dielectrics, Austin, Univer. Puss*, pp. 1010-1031.
4. Ostapenko, A.A. (2009), "About diffusion of hydrocarbons in a disperse system in an electric field", *Problemy pryrodokorystuvannya ta stalogo rozvytku y tekhnogennoy bezpeky regioniv* [Problems of nature use and continuous development and technogenic safety of regions], *Materialy V Mizhnarodnoy Konferentsii* [Materials of V International Conference], Dnipropetrovsk, Ukraine, pp. 141-144.
5. Ostapenko, A.A. (2007), "EHD-flows as means of heat exchange in the usdovmyakh of extreme temperatures", *Problemy pryrodokorystuvannya ta stalogo rozvytku i tekhnogennoi bezpeky regioniv* [Problems of nature use and continuous development and technogenic safety of regions], *Materialy IV Mizhnarodnoy Konferentsii* [Materials of IV International Conference], Dnipropetrovsk, Ukraine, Vol. 2, pp. 66-70
6. Lyutiy, A.I., Glushko, L.N., Ostapenko, A.A. and Gorobec, L.J. (2011), "Role of thermodynamical coordinates of substance in problems of a dispersion", *Materials of the Congress of separators of the CIS countries*, Vol. 1, pp. 337-342
7. Stishkov, Y.K. and Steblyanko, A.V. (2011), "Breakdown of the homogeneity of weakly conducting liquids in high electric fields", *Zh. Tekh. Fiz.*, vol. 67, pp. 105-111.

Про авторів

Остапенко Анатолій Олексійович, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (ДВНЗ «НГУ»), Дніпро, Україна, anatolyalexostapenko@gmail.com

Журавльов Михайло Олександрович, магістр, старший викладач кафедри фізики, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (ДВНЗ «НГУ»), Дніпро, Україна, zhuravlyov.mikhail@gmail.com

Курнат Наталія Леонідівна, магістр, старший викладач кафедри фізики, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (ДВНЗ «НГУ»), Дніпро, Україна, nmu.kurnat@gmail.com

About the authors

Ostapenko Anatoly Oleksijovych, Candidate of Physics and Mathematics (Phis-Math.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, State Higher Educational Institution «National Mining University» (SHEI NMU), Dnipro, Ukraine, anatolyalexostapenko@gmail.com

Zhuravlyov Mykhaylo Oleksandrovych, Master of Science, Senior Lecturer of the Department of Physics, State Higher Educational Institution «National Mining University» (SHEI NMU), Dnipro, Ukraine, zhuravlyov.mikhail@gmail.com

Kurnat Natalija Leonidivna, Master of Science, Senior Lecturer of the Department of Physics, State Higher Educational Institution «National Mining University» (SHEI NMU), Dnipro, Ukraine, nmu.kurnat@gmail.com

Аннотация. Существует ряд рабочих моделей образования ЭГД-течений. Во всех случаях причиной ЭГД-течений является нескомпенсированный заряд. Для его существования нужен активный электрод-концентратор. Однако известно, что ЭГД-течения существуют и в однородных полях. Целью нашего исследования является оценка влияния различных форм электродов на ЭГД-течения. На основе эксперимента проведен анализ и классификация ЭГД-течений в разных электродных системах. Были описаны зоны и ион-молекулярные структурные единицы. Существует три зоны центрального потока ЭГД-течения: –зона ускорения, зона постоянной скорости и зона торможения. ЭГД-течения в разных электродных системах подобны. ТЭГД модель не описывает возникновение объемного заряда. Эксперименты показали, что температурный градиент в зоне активного электрода отсутствует, а ЭГД-течения существуют до замерзания жидкости.

Ключевые слова: заряд, ЭГД-течение, кинематика жидкости, избыточный заряд, диэлектрики, ион-молекулярные структуры, активный электрод, зоны центрального потока, зоны ускорения и торможения, подобные течения.

Annotation. There are several working models concerning the formation of EHD flows. In the context of every case, noncompensated (excessive) electric charge initiates the EHD flows. Active concentrator electrode is required for their origination. However, it is known that EHD flows are also available in homogenous electric fields. Objective of the studies was to assess the effect of different forms of electrodes on EHD flows. EHD flows have been analyzed and classified in the context of various electrode systems. Both areas and ion-molecular structural unit have been described. There are three areas of the major stream of the EHD flow: acceleration area, an area of stabilized velocity, and deceleration area. EHD flows are similar in terms of different electrode systems. TEHD model cannot describe the generation of volume charge. The experiments have shown that temperature gradient is not available within a zone of active electrode and EHD flows exist up to the freezing point of a liquid.

Key-words: a charge, EHD flow, fluid kinematics, excessive charge, dielectrics, ion-molecular structures, active electrode, central flow areas, acceleration area, deceleration area, similar flows.

Статья поступила в редакцию 30.11.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.П. Франчуком