

УДК 537.8:532.5

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

ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРАНИЦІ РОЗДІЛУ ЕЛЕКТРОД – ДИЕЛЕКТРИК НА ЕГД-ТЕЧІЮ

Остапенко А.А., канд. фіз.-мат. наук, доцент,
Журавлев М.А., магістр
(ГБУЗ «НГУ»)

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ЭЛЕКТРОД – ДИЭЛЕКТРИК НА ЭГД-ТЕЧЕНИЕ

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

HOW PROPERTIES OF ELECTRODE-DIELECTRIC BOUNDARY EFFECTION THE EHD-FLOW

Анотація. Були проведені експериментальні дослідження у різних рідинних діелектриках при різних матеріалах електродів. Залежності провідності й швидкості для різних електродів мають типовий характер: на низьковольтній ділянці залежності виконується закон Ома. На високовольтній – залежність має вид $G = kU + c$. Виявлено аномальний характер цієї залежності для металів електродів з низькою роботою виходу електронів. Коефіцієнт високовольтної провідності визначається матеріалом електроду. Це показує на те, що високовольтна провідність визначається поверхневою іонізацією, швидкість ЕГД-течії залежить від заряду, який утворюється на поверхні електроду.

Ключові слова: ЕГД-течія, гранична іонізація, поверхнева іонізація, матеріал електродів, висока напруга, робота виходу електрона з металу, рідинний діелектрик, зарядоутворення.

Для дослідження впливу домішкової сполуки на інтенсивність зарядоутворення на катоді й швидкість ЕГД-течії був випробуваний ряд речовин, які володіють необхідним набором властивостей. Ці речовини повинні розчинятися у початковій рідині-ізооктані, підвищувати її низьковольтну провідність і мати підвищену спорідненість до електрона. У таблиці 1 наведені характеристики розчинів використаних речовин, значення низьковольтної провідності яких, були виміряні в камері із плоскопаралельними латунними електродами. Відомо, що серед елементів періодичної системи Менделєєва підвищену спорідненість до електрона мають елементи 7 групи, що містять сім електронів у зовнішній оболонці. Найбільш прийнятними, що розчиняються в неполярних розчинниках, є галогени: фтор (3,4 еВ), хлор (3,9 еВ), бром (3,1 еВ), йод (3,2 еВ). Спорідненість до електрона хімічних сполук вивчено значно гірше. У деяких сполуках величина спорідненості до електрона визначається наявністю гідроксильної групи OH (2,7-2,6 еВ), аміногрупи NH_2 (1,2 еВ) і ін.

Тому в числі домішок, що володіють підвищеними електронно-акцепторними властивостями, були обрані йод, бутиловий спирт, α -лейцин, тетраброметилен (таблиця 1) [2, 3], [Стишков Ю.К., 1979].

Таблиця 1 - Характеристики розчинів використаних речовин

Номер розчину	Назва домішки	Сполука	c , г/см ³	σ , (Ом·см) ⁻¹
1	Без домішки	C ₈ H ₁₈	-	5·10 ⁻¹⁵
2	α -лейцин	(CH ₃) ₂ C ₃ H ₅ (NH ₂)CO OH	10 ⁻⁴	5·10 ⁻¹²
3	Бутил. спирт	C ₄ H ₈ OH	10 ⁻¹	10 ⁻¹²
4	Тетраброметилен	Br (OH) ₄	10 ⁻³	3·10 ⁻¹³
5	Йодне олово	Sn J ₂	10 ⁻⁴	10 ⁻¹²
6	Йод	J ₂	10 ⁻⁴	5·10 ⁻¹⁴

У якості однієї з домішок обрана сіль - йодне олово. Як відомо, солі мають іонну кристалічну структуру й при розчиненні найбільш легко дисоціюють з утворенням у розчині іонів. Дослідження розчину солі дозволить найбільш чітко оцінити роль дисоціації, у тому числі й ефекту Віна у процесах іоноутворення.

При виборі домішок також важливу роль відіграють їхні розчинності в ізооктані й здатність змінювати його низьковольтну провідність. Із числа випробуваних 20 різних речовин тільки наведені в таблиці 1 задовольняли всім висунутим вимогам.

У першій серії експериментів досліджувався вплив домішкової компоненти рідини на середню швидкість ЕГД-течії та електропровідність середовища [1], [Стишков Ю.К., 1989]. Матеріал (мідь) і геометрія електродів залишалися незмінними. У розчинах ізооктану ЕГД-течія реалізувалася у вигляді центрального струменя, спрямованого від дровового електрода до плоского. Кінематика ЕГД-течії загалом відповідає його кінематиці в розчинах бутилового спирту в трансформаторному маслі. На рисунку 1 наведені залежності середньої швидкості ЕГД-течії в центральному струмені від напруги. У режимі розвиненої ЕГД-течії залежності $v(U)$ у досліджених рідинах, як і в розчинах на основі трансформаторного й касторового олій, близькі до лінійного.

Невелика тенденція до насичення спостерігається в розчинах йодного олова й тетраброметилена. Найменш інтенсивними ЕГД-течії виявилися в чистій рідині, найбільш інтенсивними – у розчині лейцину в ізооктані. Так, наприклад, при напрузі 40 кВ швидкість течії в чистій рідині становить 12 см/с, а в розчині α -лейцину в п'ять разів більше – 60 см/с. Слід зазначити, що за результатами дослідження залежності швидкості ЕГД-течії від розмірів електроду в трансформаторному маслі, при зміні діаметра електрода від 3·10⁻³ до 3 мм, швидкість змінювалася не більш ніж у два рази. Істотне зростання швидкості

при введенні домішок, що мають підвищеними електронно-акцепторними властивостями, свідчить про визначальну роль поверхневого іоноутворення на границі електрод-рідина в процесах виникнення ЕГД-течії.

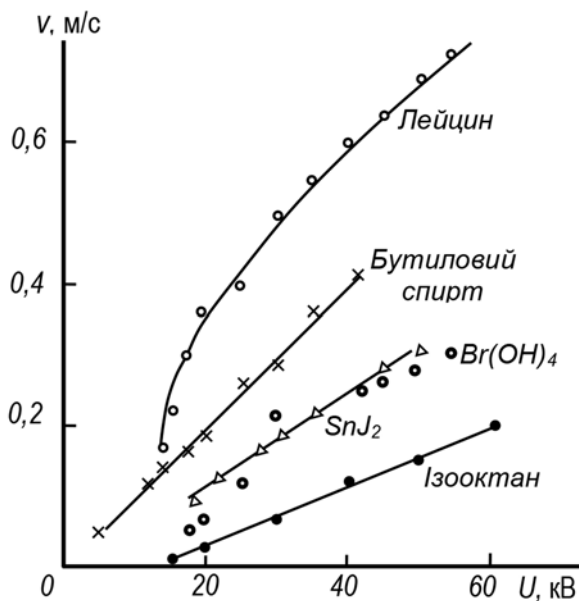


Рисунок 1 - Залежності середньої швидкості ЕГД-течії в центральному струмені від напруги

Раніше були наведені дані про вплив концентрації розчиненого йоду на інтенсивність ЕГД-течії у трансформаторному маслі. Як видно з таблиці 1, спорідненість до електрона молекул йоду становить 3,2 еВ. Низьковольтна провідність розчинів і швидкість ЕГД-течії у системі дріт над площиною виявилася пропорційною концентрації розчиненого йоду. Діапазон зміни концентрацій склав $10^{-5} \div 10^{-3}$ г/см³. Таким чином, домішки, що мають підвищену спорідненість до електрона (йод, бутиловий спирт, α -лейцин) інтенсифікували ЕГД-течію. У той же час, як видно з рисунку 1, домішки йодного олова - типової солі, що мають підвищене значення коефіцієнта дисоціації, викликають менш істотний ріст швидкості ЕГД-течії і провідності рідини. Цей результат є ще одним свідченням другорядної ролі об'ємної дисоціації під дією локально підвищеної напруженості електричного поля (ефект Віна) у процесах формування об'ємного заряду [3].

На рисунку 2 наведені залежності провідності середовища від напруги, зняті одночасно із залежностями $v(U)$. Провідність G визначалася за формулою $G=I/U$. Залежності мають типовий характер - в області низьких напруг виконується закон Ома ($G_0 = \text{const}$), в області високих напруг у межах похибки спостерігається лінійна залежність провідності від напруги ($G=k+c$). Як видно з малюнка, має місце істотний ріст значення низьковольтної провідності при введенні домішок, що мають підвищену спорідненість до електрона. Має місце кореляція залежностей $v(U)$ зі значеннями G_0 : криві відповідно лейцину й ізооктану, лежать вище відповідних кривих для йодного олова й тетраброметилену (позначення на рисунках 1 і 2 однакові). Слід зазначити, що

розчини солі, що мають підвищену здатність до дисоціації, приводять до менш істотного росту низьковольтної провідності, ніж розчини речовин, що мають виражену спорідненість до електрону. Цей факт свідчить про першорядну роль іоноутворення на катоді за схемою $C + e \rightarrow C^-$, а не дисоціації молекул розчиненої речовини, у тому числі й під дією сильного електричного поля. Як видно з рисунку 2, частина високовольтної провідності в розчині йодного олова мало відрізняється від відповідної частини в чистому ізооктані, абсолютні значення високовольтної провідності в розчині йодного олова знижені щодо розчинів лейцину й бутилового спирту.

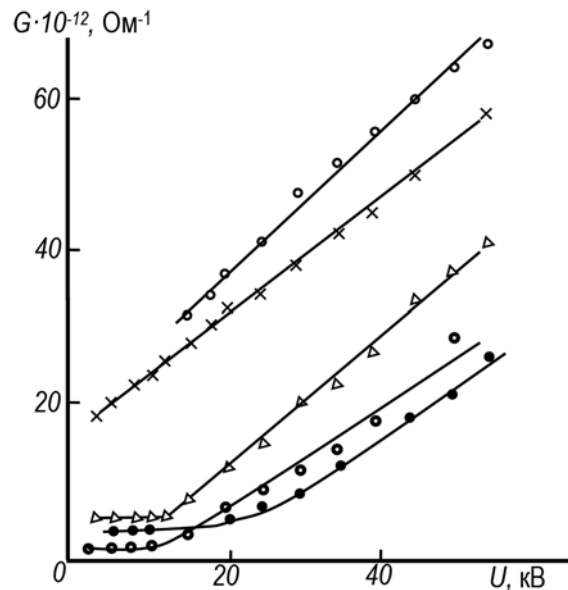


Рисунок 2 - Залежність провідності середовища від напруги, зняті одночасно із залежностями $\nu(U)$

При введенні в рідину домішок про характер іоноутворення можна судити лише по побічних ознаках, таким, наприклад, як іоногенні властивості речовини, що розчиняється. У той же час зміна значення провідності при постійному складі середовища в результаті цілеспрямованого підбору матеріалу електроду може стати прямим доказом визначальної ролі поверхневого іоноутворення в процесах проходження струму й виникнення ЕГД-течій. Тому друга серія експериментів стосувалася дослідження впливу матеріалу катода на кінематику ЕГД-течії і на електричний струм через рідину.

Реакція іоноутворення на поверхні катоду у відповідності з запропонованим механізмом визначається з однієї сторони електронно-акцепторними властивостями молекул домішку, а з другої сторони електронно-донорними властивостями поверхні електродів. Досліджений вплив матеріалу катоду на кінематику ЕГД-течії й провідність рідини у системі провід над площиною. Опорний електрод (анод) – мідна пластина 25 см². Результати досліджень показали, що значення середнього електричного числа Рейнольдсу ($Re_{el} = VI_0/bU$) зростає від 2 (для Cu) до 25 (для Al). Це означає, що середня густина об'ємного заряду у центральній частині ЕГД-течії зростає зі зменшенням

роботи виходу електрону з металу електроду. Значення низьковольтної провідності зростає від Pt до Al.

Матеріал катоду змінювався від Cu(4,45 eV) до Zn (3,55 eV).

Всі експерименти проведені в системі електродів дріт (діаметр 0,5 - 0,1 мм) над площиною (мідь) в очищеному ізооктані. Матеріал циліндричного катода змінювався в порядку зменшення роботи виходу від платини до алюмінію (таблиця 1). Вся решта умов експерименту зберігалися строго постійними. Перед кожним експериментом, та після нього, проводився контроль значень низьковольтної провідності рідини в стандартній камері з латунними плоскопаралельними електродами при напрузі живлення 10 В.

Відомо [4], що у звичайних умовах поверхні багатьох металів покриті плівками важкорозчинних окислів, які істотно змінюють роботу виходу електрону з поверхні електроду. Тому перед експериментом поверхні електродів ретельно очищалися електророзчиненням, або абразивним очищенням безпосередньо в рідині, без контакту з атмосферним повітрям. На рисунку 3 приведені залежності середньої швидкості в центральному струмі ЕГД-течії від потенціалу поверхні циліндричного катода. Течія від платинового катода була настільки слабкою, що її не вдалося зареєструвати.

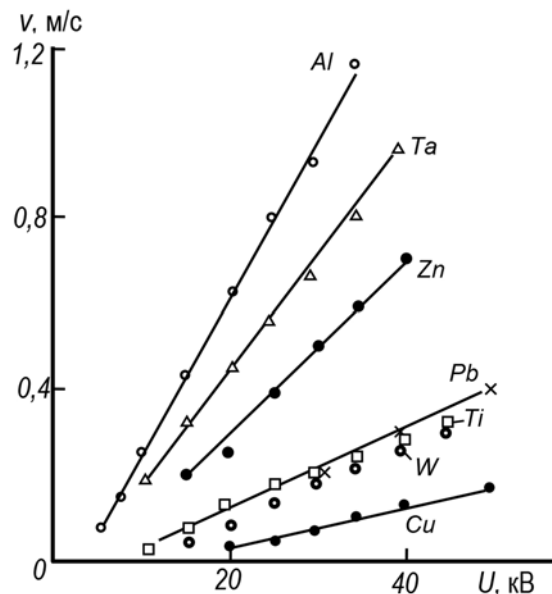


Рисунок 3 - Залежність середньої швидкості в центральному струмі ЕГД-течії від потенціалу поверхні циліндричного катода

Залежності швидкості від напруги, зняті для кожного з металів, задовільно апроксимуються відрізками прямих, кожна з яких характеризується постійним значенням електричного числа Рейнольдсу: $Re_{эл} = vl_0 / (b)$. Значення $Re_{эл}$ зростають при зменшенні роботи виходу електрону від платини до алюмінію. Аномально високе значення в ряді досліджених матеріалів спостерігається лише для течії від поверхні танталового електроду. Діапазон зміни електричного числа Рейнольдса становить: від $Re_{эл} = 1$ для платини до $Re_{эл} = 30$ для алюмінію. Як було показано раніше, значення граничного електричного

числа Рейнольдса характеризує середню густину об'ємного заряду в центральному струмені ЕГД-течії. Тому тільки зміна матеріалу катода при опорному мідному аноді й інших рівних умовах приводить до зміни середньої густини надлишкового заряду в центральному струмені ЕГД-течії більш ніж на порядок. Цей результат є прямим доказом визначальної ролі іонізації домішкових молекул біля поверхні катода за схемою: $C - e \rightarrow C^-$. Як ми вже відзначали, значення низьковольтної провідності контролювалося до та після експерименту. В міру зменшення роботи виходу електрону від катода інтенсивність реакції іонізації відповідно до формули $Re_{el} = b_r / b_i = (k_2 / b_i) E$, зростає (тут b_r – ЕГД-рухливість, b_i – іонна рухливість). У стаціонарному режимі об'ємний заряд, що утворився біля катода, ставиться в центральний струмінь, збільшуючи надлишкову густину об'ємного заряду й значення електричного числа Рейнольдса. Аномально високі швидкості від поверхні танталу, очевидно, пов'язані з особливим станом поверхні танталового електрода. На рисунку 4 наведені залежності провідності середовища від напруги, зняті одночасно з виміром швидкості ЕГД-течії.

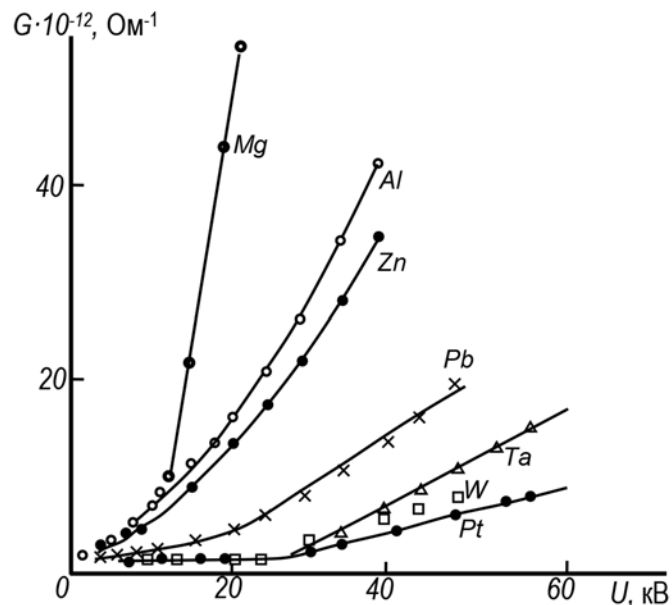


Рисунок 4 - Залежність провідності середовища від напруги, зняті одночасно з виміром швидкості ЕГД-течії

Залежності провідності від напруги, для фіксованого матеріалу катода, мають переважно типовий характер: на низьковольтній ділянці виконується закон Ому ($G_0 = const$); на високовольтній – $G = kU + c$, (де U – напруга; k – коефіцієнт пропорційності). Аномальний нелінійний характер виявлений для матеріалів зі зниженою роботою виходу: титану, цинку й алюмінію. Тангенс кута нахилу високовольтних ділянок залежностей збільшується зі зменшенням роботи виходу від платини до алюмінію. Є кореляція між електричним числом Рейнольдса та крутістю високовольтної ділянки. Аномалії в ряді досліджених матеріалів виявлені для титанового й танталового катодів. Експерименти з магнієвим електродом показали аномально високі значення високовольтної

провідності: при напрузі 30 кВ струм через середовище досягав 10^{-2} А, що відповідає значенню провідності $0,33 \cdot 10^{-2}$ (Ом·см) $^{-1}$. У цих експериментах відносна зміна провідності в порівнянні з її низьковольтним рівнем склало 10^6 . Як видно з рисунку 4, максимальна відносна зміна високовольтної провідності для цинкового електроду становило 500.

При вимірах проводився контроль значень низьковольтної провідності в еталонному середовищі з латунними електродами, який показав, що величина низьковольтної провідності не змінювалася за час експерименту, завдяки розчиненню в рідині домішок, а визначалася процесами на поверхні електроду. Тому зміна величини й характеру залежності високовольтної провідності від напруги при зміні матеріалу катода є прямим доказом того, що іоноутворення у рідині відбувається не за рахунок дисоціації домішок, а внаслідок іонізації домішкових молекул на поверхні електродів. Оскільки іонізація на поверхні катода відбувається за схемою $C + e \rightarrow C^-$, то значення катодного струму відповідно визначається різницею між роботою виходу з поверхні електроду й спорідненістю до електрона молекул домішки й сильно зростає в міру зменшення роботи виходу електронів з поверхні катода. Характерно також, що величина коефіцієнту високовольтної провідності, а у випадку цинкового й титанового катодів - від залежності $G=G(U)$, визначається не напруженістю поля в зонах біля електроду областях, як це треба відповідно до формули Онзагера, а матеріалом електроду. Це говорить про те, що високовольтна ділянка залежності $G=f(U)$ обумовлена поверхневою іонізацією. Наявні аномалії варто зв'язати, очевидно, з різним ступенем чистоти обробки поверхні електродів. Результати дослідження є прямим доказом визначальної ролі поверхневого зарядоутворення Ю як у процесах високовольтної провідності, так і у процесах утворення об'ємного заряду, який визиває ЕГД-течі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Остапенко, А.О. Посилення дифузії у вуглеводневих діелектричних рідинах у зовнішньому електричному полі / А.О. Остапенко // Проблеми природокористування та сталого розвитку й техногенної безпеки регіонів: Матеріали V міжнародної конференції / Дніпропетровськ, вересень 2011. – с.210-214.
2. Стишков, Ю.К. Формирование электрогидродинамических течений в сильнонеоднородных электрических полях при двух механизмах зарядообразования / Ю.К. Стишков, В.А. Чирков // ЖТФ. - 2014. - т.82. – с. 3-13.
3. Буянов, А.В. Особенности кинематической структуры электрогидродинамического течения в системах электродов «провод-провод» и «провод-плоскость» / А.В. Буянов, Ю.К. Стишков // ЖТФ. - 2003. - т. 73. – с.34-40.
4. Ильин, В.И. Электроконвекция слабопроводящих жидкостей в постоянном электрическом поле / В.И. Ильин // ЖТФ. - 2014. - т. 83. – с.64-73.

REFERENCES

1. Ostapenko, A.O. (2011), "Strengthening of diffusion in hydrocarbonic dielectric liquids in an external electric field", *Problemy pryrodokorystuvannya ta stalogo rozvytku y tekhnogennoi bezpeky regioniv* [Problems of nature use and continuous development and technogenic safety of regions], *Materialy V Mizhnarodnoi konferentsii* [Materials of V International Conference], Dnipropetrovsk, Ukraine, September 2011, pp. 210-214
2. Stishkov, Y.K. and Chirkov, V.A. (2014), "Formation the electrohydrodynamic currents in strongly inhomogeneous electric fields at two mechanisms of a zaryadoobrazovaniye", *Zh. Tekh. Fiz*, vol. 82, pp. 3-13.

3. Bujanov, A.V. and Stishkov, Y.K. (2003), "Features of kinematic structure of an electrohydrodynamic current in the systems of electrodes "wire wire" and "wire plane", *Zh. Tekh. Fiz*, vol. 73, pp. 34-40.

4. Ylyin, V.I. (2014), " Electroconvection of weak-conducting liquids in a constant electric field", *Zh. Tekh. Fiz*, vol. 83, pp. 64-73.

Об авторах

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

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 Myhajlo 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

Аннотация. Были проведены экспериментальные исследования в различных жидких диэлектриках при различных материалах электродов. Проводимости жидкостей изменялись посредством использования различных полярных добавок. Менялись также материалы электродов. Зависимости проводимости и скорости ЭГД- течений для различных материалов электродов имеют типовой характер: на низковольтном участке зависимости выполняется закон Ома. На высоковольтном - $G = kU + c$. Обнаружен аномальный характер зависимости для материалов электродов с низкой работой выхода электронов. Коэффициент высоковольтной проводимости определяется материалом электродов. Это указывает на то, что высоковольтная проводимость определяется поверхностной ионизацией. Скорость ЭГД- течения зависит от заряда, который формируется на поверхности электрода.

Ключевые слова: ЭГД-течения, граничная ионизация, поверхностная ионизация, материал электродов, высокое напряжение, работа выхода электрона из металла, жидкие диэлектрики, ионообразование, проводимость жидкостей, полярные добавки.

Annotation. Experiments were carried out with various liquid dielectrics and electrodes made of different materials. In the context of different electrodes, dependences of conductivity and velocity are typical: the Ohm's law is met within low-voltage section of the dependence. Within high-voltage section, the dependence is $G = kU + c$. Anomalous character of the dependence has been identified for those electrode metals where electron liberation level is low. Coefficient of high-voltage conductivity depends upon electrode material. It means that high-voltage conductivity is determined by means of surface ionization; and velocity of EHD-flow depends upon charge generating on the electrode surface.

Key-words: EHD flow, boundary ionization, surface ionization, electrode material, high voltage, electron liberation from metal, liquid dielectrics, charge generation.

Статья поступила в редакцию 22.08.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, чл.-кор. НАН Украины А.И. Волошиным