

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СУСПЕНЗІЙ

А. М. Должанський, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Національної металургійної академії України (НМетАУ), м. Дніпро

В. О. Пінчук, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри НМетАУ, м. Дніпро

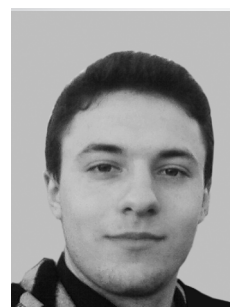
Є. М. Колот, бакалавр НМетАУ, м. Дніпро



А. М. Должанський



В. О. Пінчук



Є. М. Колот

Удосконалено метод та представлено результати щодо визначення активної та ємнісної складових імпедансу та адмітансу на прикладі суспензії, що містить дрібнодисперсний графіт як дисперсну фазу, у порівнянні з водо-вугільною суспензією подрібненого газового вугілля. Виявлено та кількісно оцінено вплив складу суспензії, особливостей схеми вимірювання, виду електричного струму (постійний або змінний), напруги та її частоти на електричні характеристики суспензій. Визначено умови, при яких мінімізується дестабілізуючий вплив зовнішніх факторів на результати випробувань.

Ключові слова: суспензія, електричні властивості, метод вимірювання.

The method is improved and results are presented on the determination of the active and capacitive components of the impedance and admittance by the example of the suspension containing fine graphite as a disperse phase in comparison to the water-coal suspension of crushed gas coal. The influence of the composition of the suspension, the characteristics of the measurement scheme, the type of electric (constant or alternating) current, the voltage and its frequency on the electrical characteristics of the suspensions were determined and quantitatively assessed. The conditions under which the destabilizing influence of external factors on the test results is minimized are determined.

Keywords: suspension, electrical properties, measurement method.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

Деякі промислові технології передбачають застосування суспензій, наприклад, технологічних мастил при обробці металів тиском, водо-вугільного палива в теплотехнічних установках, глинистої пульпи при бурінні свердловин або виготовленні бетону тощо. Указані речовини являють собою суміш дисперсної (зазвичай – твердої дуже подрібненої) та дисперсійної (часто – води) фаз. Для запобігання розшаруванню до такої суміші нерідко додають стабілізатори (зокрема, поверхнево-активні речовини типу миль, полімерів або інших вуглеводнів, які розчиняються у дисперсійній фазі). Природу і вміст стабілізатора визначають із урахуванням складових конкретної суспензії.

Іноді для поліпшення властивостей та/або транспортування суспензії піддають електромагнітній обробці [1]. За таких умов параметри відповідних пристроїв залежать від складу та призначення суспензії. Але загальною вимогою залишається необхідність мати простий інструментарій визначення електричних властивостей суспензій, перш за все – характеристик їхньої електропровідності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У технічній літературі наводиться певна, досить обмежена інформація, що стосується конкретних суспензій. Їхні електричні властивості зумовлюються складними процесами, що взаємопов'язані

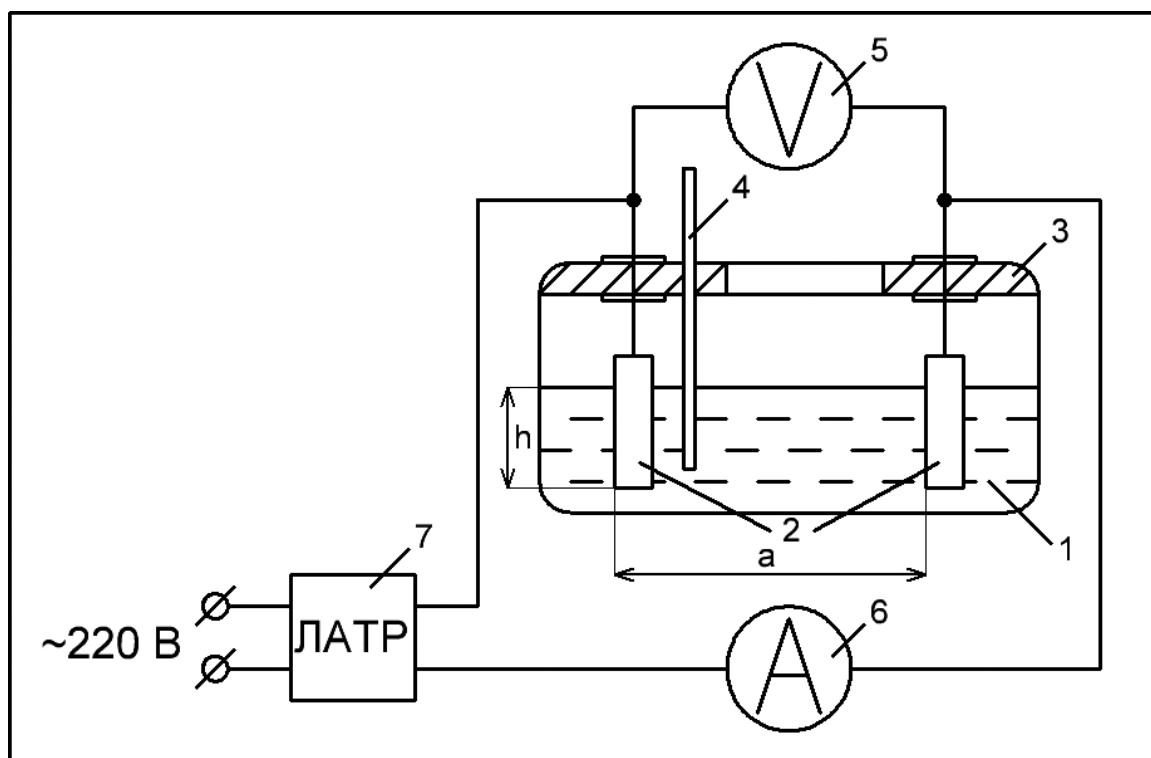


Рис. 1. Схема вимірювання електричної напруги та сили струму в суспензії: 1 — ємність із суспензією; 2 — мідні електроди; 3 — кришка ємності з контактами та утримувачем термометра 4; 5 — вольтметр; 6 — міліамперметр; 7 — пристрій електричного живлення: ЛАТР (лабораторний автотрансформатор) або генератор змінного струму з керованою частотою коливаль

з проходженням крізь них електричного струму. При цьому електропровідність суспензії може зумовлюватися одночасно декількома видами носіїв електричних зарядів: іонів, електронів та заряджених частинок дисперсної фази. На додачу до цього, у суспензії може утворюватися так званий “подвійний електричний шар”, який пов’язаний з “поверхневою” електричною провідністю. Кожна з указаних складових має свою динаміку руху, що характеризується часом переміщення носіїв зарядів: від часток мікро- та мілісекунди (електрони та іони) до декількох хвилин (заряджені міцели). На вказані параметри також можуть впливати умови їх вимірювання (постійний або змінний струм, рівень електричної напруги, температура, конструкція вимірювального пристрою, наявність перемішування тощо) [2].

При цьому “пряме” визначення за допомогою омметра активного електричного опору R на постійному струмі та відповідної електропровідності

$$\Gamma = \frac{1}{R} \quad (1)$$

може не дати адекватних результатів у зв’язку з поляризацією рідини та коагуляцією її часток на одному з електродів. Сама поляризація, у залежності від складу суспензії, також може бути концентраційною (“міцельною”, “іонофорезною”) або іонною. На результати вимірювань суттєво можуть вплинути і “подвійний електричний шар” та поверхнева провідність рідини [3].

Розрахунок R на змінному електричному струмі за результатами вимірювання напруги U та сили струму I у відповідності до закону Ома:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (2)$$

як це здійснено у дослідженні [1] за моделлю на рис. 1, теоретично певною мірою усуває указані впливи, але при цьому отримувані дані додатково стають залежними від частоти f струму [4, 5].

Слід також враховувати залежність електричних характеристик суспензії від напруги, при якій здійснюються вимірювання. Так, у роботі [1] виявлено, що зі збільшенням електричної напруги від 0,2 до 120 В та відповідної зміни струму питомий опір водо-вугільної суспензії зменшувався від 1,25 до 0,6 Ом·м, що супроводжувалося зростанням температури рідини від 24 до 58 °С. Подальший підйом напруги супроводжувався закипанням суспензії з різким падінням її опору.

Подальший аналіз схеми вимірювання, наведеної на рис. 1, виявив, крім основної траси електричного струму “перпендикулярно” площинам електродів, ще й імовірність появи “паразитного” струму з невизначеною трасою з їх тильних сторін та відповідного опору, який формально стає паралельним основному.

Також на підставі даних джерел [3–5] можна очікувати появу ємнісного опору проходженню змінного струму між електродами. Внаслідок цього розрахунок електричних параметрів суспензії за результатами вимірювання сили змінного струму I

та його напруги U за схемою на рис. 1 дає значення не активного електричного опору R , а імпедансу Z_{Σ} всієї вимірювальної схеми

$$Z_{\Sigma} = \frac{U}{I} \quad (3)$$

та відповідного адмітансу Y_{Σ} всієї схеми

$$Y_{\Sigma} = \frac{1}{Z_{\Sigma}} \quad (4)$$

Взагалі, імпеданс Z , за умови явної відсутності індуктивної складової та ймовірної наявності ємнісної складової струму в суспензії, має розраховуватися за формулою [3]

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_c^2}, \quad (5)$$

де C – електрична ємність.

При цьому ємнісна складова імпедансу (ємнісний опір)

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (6)$$

залежить не тільки від властивостей суспензії, але й від параметрів схеми вимірювання (електричного ланцюга).

Частина проблеми, яка вимагає розв'язання, та постановка завдання

Для узагальнення результатів та нівелювання впливу конструктивних особливостей оснащення за рис. 1 при вимірюваннях доцільно величини R та X_c активної і ємнісної складових імпедансу Z визначати у зв'язку з відповідними значеннями питомого електричного опору:

активного

$$\rho = \frac{R \cdot S}{a}, \quad (7)$$

реактивного (ємнісного)

$$\rho_c = \frac{X_c \cdot S}{a}, \quad (8)$$

та питомої електропровідності: активної

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad (9)$$

реактивної (ємнісної)

$$\gamma_c = \frac{1}{\rho_c}, \quad (10)$$

де a , S – відстань між електродами вимірювального оснащення (див. рис. 1) та площа фронтальної поверхні одного з них відповідно. При визначенні сумарного питомого опору замість R у формулі (7) слід використовувати Z_{Σ} .

Слід враховувати, що поділ імпедансу на різні на активну R та ємнісну X_c складові є умовним, оскільки вони існують одночасно в єдиному об'ємі суспензії. Тому їх коректне визначення потребує розробки та аналізу адекватної еквівалентної схеми вимірювання та відповідної розрахункової схеми.

Мета дослідження включала вдосконалення методу та методики з експериментального визначення електричних властивостей суспензії та кількісну оцінку коригувань, які зумовлюють заходи з поліпшення раніше відомих підходів.

Виклад основних матеріалів досліджень

Як базові обрали оснащення за рис. 1 і методику вимірювань із використанням формул (2) та (7). Вони були застосовані при дослідженні властивостей водо-вугільної суспензії, яка містила (за масою) дисперсійну фазу – очищену воду та дисперсну фазу – 65 % подрібненого газового

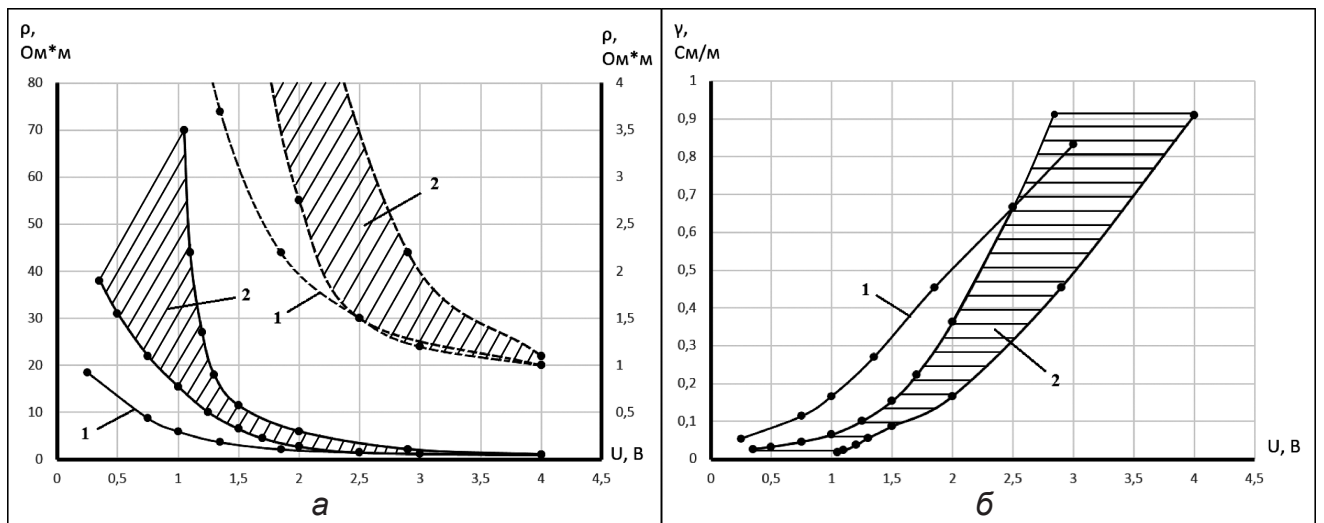


Рис. 2. Залежність питомого опору (а) та відповідної провідності (б) водо-вугільної суспензії від напруги постійного електричного струму при імпульсному підключенні живлення (1) та продовженому в часі (до 550 с) спостереженні (2); пунктир на (а) — те ж саме за шкалою на правій ординаті

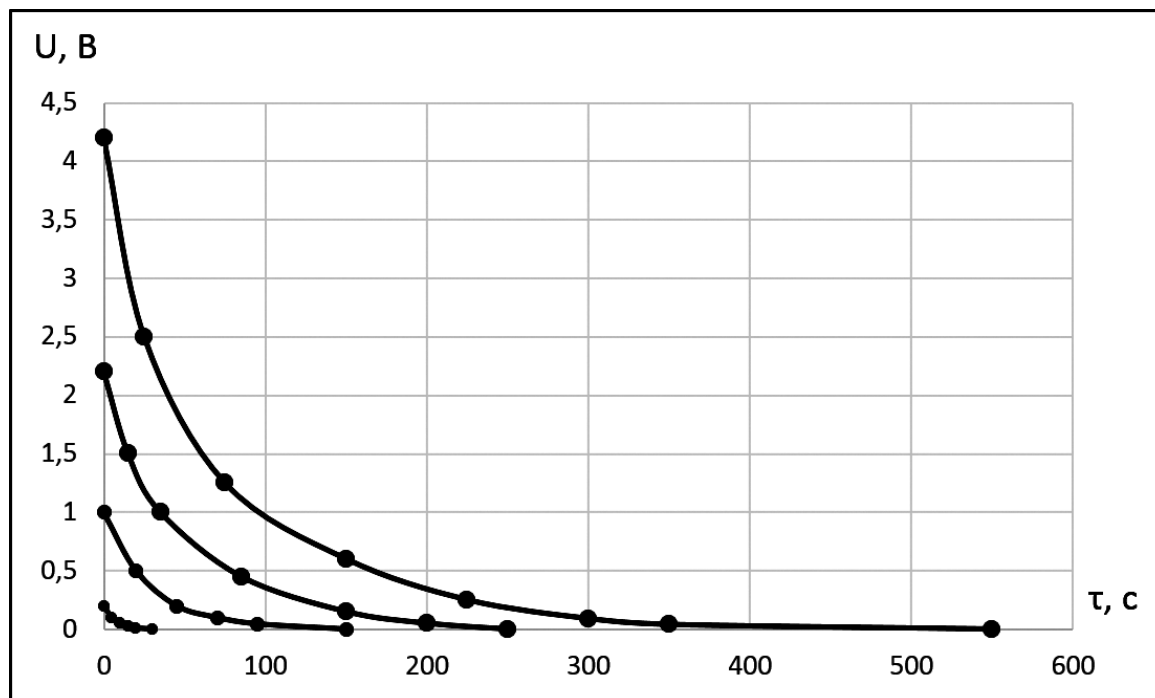


Рис. 3. Зміна у часі залишкового електричного потенціалу водо-вугільної суспензії після імпульсного підключення (з відключенням) постійного струму з різною напругою

вугілля (останній – з 59,9 % зольності, 17,4 % летких компонентів та 3,5 % вологи) [1]. При цьому вважали, що $Z_{\Sigma} = R$.

Геометричні характеристики електродної частини оснащення вимірювали штангенциркулем типу ШЦ-1. Ширина мідних електродів становила 10 мм, а глибина занурення у суспензію – 17,5 мм, тобто площа однієї (“робочої”) сторони електрода складала $S = 175 \text{ мм}^2$. Відстань між електродами (яка для запобігання викривлення ліній електричного струму взагалі має бути якомога меншою) у дослідженнях становила $a = 56,0 \text{ мм}$ для мінімізації спотворення даних вимірювань коагуляцією суспензії на електродах. Температура у приміщенні становила $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

При проведенні вимірювань із використанням омметра типу Ц-4341, який мав власне джерело живлення з дискретними значеннями постійної напруги в діапазоні 0,2...4,2 В, та електронного вольтметра, додатково до даних джерела [1] виявили різницю у значеннях питомих активних опорів та провідності суспензії при імпульсному підключенні/відключенні приладу у порівнянні з продовженим режимом вимірювань (рис. 2).

Ця різниця становила декілька десятків відсотків, особливо була відчутною при напрузі $< 1 \text{ В}$ і зменшувалася практично до 0 при підвищенні напруги до 4,2 В. При цьому зафіксовано такі факти:

- коагуляція (товщиною до 8 мм, починаючи з 10...15 с упродовж 2...5 хв) речовини суспензії на позитивному електроді, що супроводжувалося зміною струму I при постійній напрузі (заштрихована

зона) та зменшенням у часі питомого опору водо-вугільної суспензії (див. рис. 2а);

- перехід коагулянта на інший електрод упродовж 2...5 хв. після зміни полярності напруги;
- наявність на електродах залишкового електричного потенціалу $U_{\text{залиш}}$ величиною до 3,5...4 В, який особливо проявляв себе при імпульсному підключенні живлення та зменшувався до 0 (і навіть – до протилежних декількох десятків мілівольт) упродовж 30...300 с тим швидше, чим меншим був рівень початкової напруги (рис. 3).

Також встановлено практично лінійний зв'язок між напругою постійного струму та питомою електропровідністю суспензії у діапазоні 1...4,2 В (див. рис. 2б), що узгоджується з відомими літературними даними [4].

Ці явища можуть бути пояснені складним проявом іонофорезної провідності у в'язкій рідині, що стримує швидке пересування заряджених міцел, поляризацією складових суспензії, накопиченням електричного заряду в коагулянті поблизу позитивного електрода та свідчать про наявність ємності в електричному ланцюзі при вимірюваннях.

У цілому, наведені дані у зіставленні з раніше опублікованими матеріалами [1] дозволили оцінити вплив постійного та змінного струму та його напруги на поведінку та електричні властивості водо-вугільної суспензії, а також визначити необхідний час (до 2...5 хв.) стабілізації упродовж вимірювань показників відлікових пристроїв відповідних приладів.

Для зіставлення застосованих удосконалених та відомих раніше прийомів визначення електричних параметрів суспензії (див. вище) конкретний

* За участю інж. М.І. Абрамова

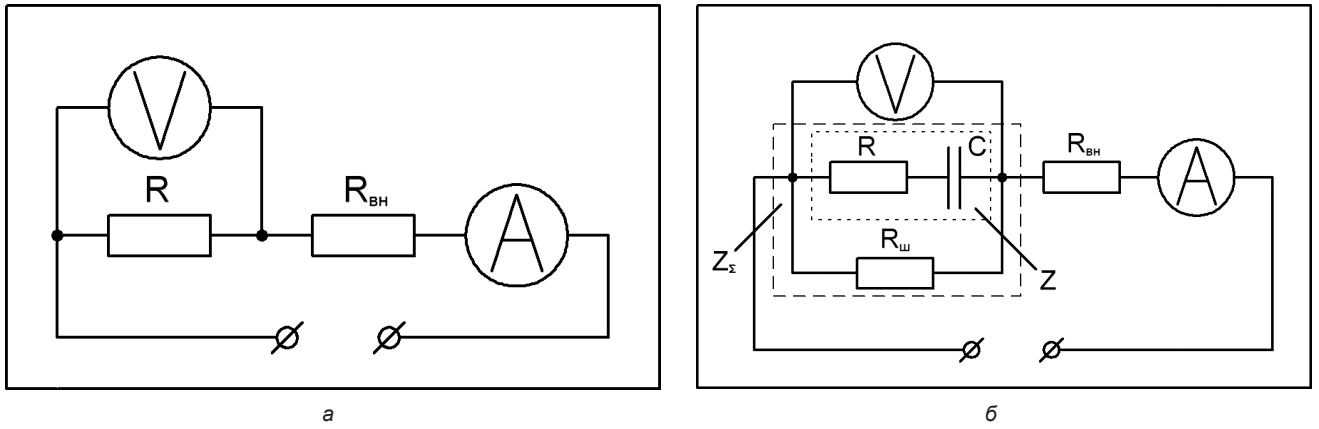


Рис. 4. Еквівалентні схеми заміщення при визначенні параметрів електропровідності суспензії: а — без урахування ємнісної складової струму; б — з урахуванням ємності C , яку включено послідовно з активним опором R суспензії (що разом визначає Z), та активного опору $R_{ш}$, який є паралельним цій RC -ділянці (що разом дає $Z_{с}$)

вибір складу досліджуваної рідини визначального значення не має. Але цікавим стає оцінка впливу складу суспензій, хоча б у схожому класі речовин, на діапазон можливої зміни їх електричних властивостей. Тому як досліджувану речовину обрали колоїдно-графітовий препарат ВКГС-0. Зазвичай він використовується як термостійке технологічне мастило у процесах обробки металів тиском (при волочінні дроту з тугоплавких металів, волочінні та прокатці труб, штампуванні тощо). Ця густа рідина за специфікацією є суспензією 20 % (за масою) високодисперсного графіту у воді, стабілізованою аміачним розчином сульфітно-спиртової барди (ГОСТ 5.1385–72; ТУ 113–48–52–89). Як виявилось, внаслідок вилучення випарюванням летких компонентів суспензії до постійної маси за температури $\sim 80^{\circ}\text{C}$, реальна кількість твердої фази у суспензії становила 32,4 %. Для визначення цього застосували ваги типу МН-50 з діапазоном вимірювання 0...500 г.

При дослідженні електричних властивостей указаної суспензії використали оснащення за рис. 1. Температура у приміщенні становила 21°C .

Рівень електричного струму вимірювали цифровим мультиметром типу DT9205A з піддіапазонами вимірювання 0...20 та 0...200 мА, внутрішній активний опір цього приладу $R_{\text{прил}} = 1,3 \text{ Ом}$. Значення електричної напруги визначали за допомогою цифрового мультиметра типу DT9208A з діапазоном вимірювання 0...20 В. Активний опір вольтметра – 10 МОм (його впливом на відповідні результати вимірювання напруги знехтували).

З урахуванням паспортних характеристик указаних приладів визначили максимальні межі робочого діапазону їхніх частот – 30...800 Гц.

Одночасно за допомогою мультиметра визначили, що сумарний активний опір провідників та їхніх з'єднань становив $R_{\text{пров}} = 0,2 \text{ Ом}$.

Змінний струм контрольованої частоти з указанного діапазону до схеми подавали через електронний підсилювач від генератора за допомогою відкритої для користувачів комп'ютерної програми Two Channels Frequency Generator (діапазон частот $f = 1...20000 \text{ Гц}$) [6], яку у вигляді відповідного файла було завантажено у ПЕОМ.

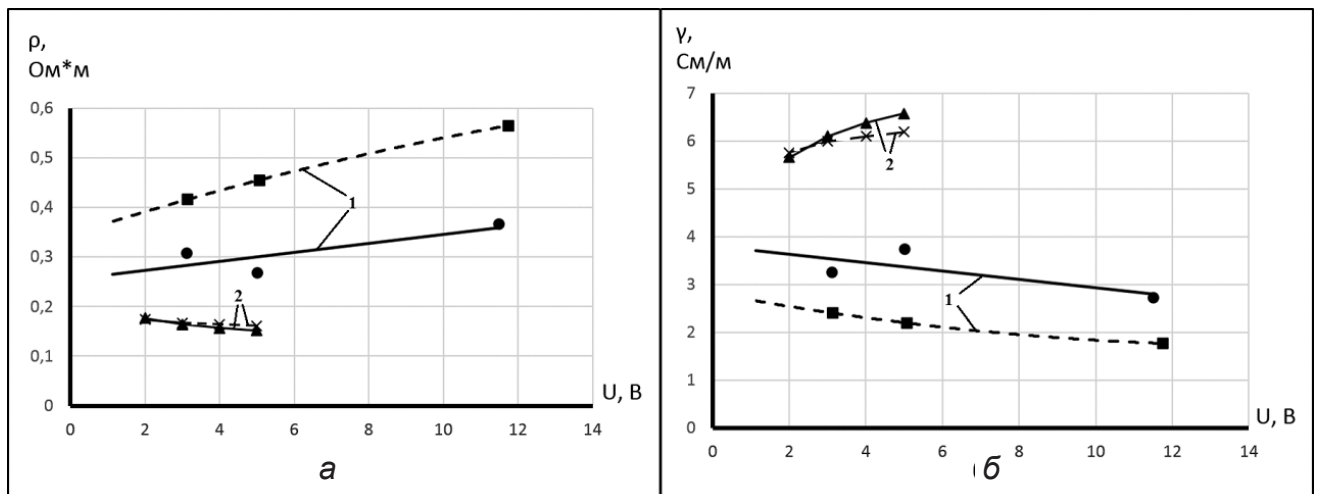


Рис. 5. Залежність питомого опору (а) та питомої провідності (б) суспензії ВКГС-0 від напруги постійного (1) та змінного з частотою 10 Гц (2) струму без ізоляції тильних поверхонь електродів (суцільні лінії) та з такою ізоляцією (пунктирні лінії)

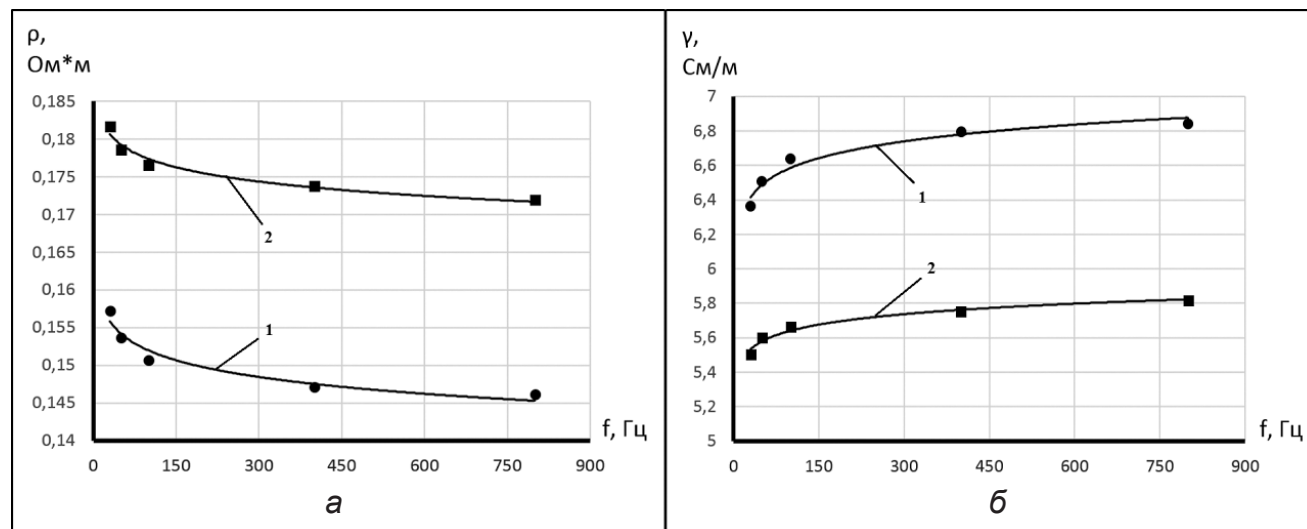


Рис. 6. Залежність питомого опору (а) та питомої провідності (б) суспензії ВКГС-0 від частоти змінного струму за відсутності (1) та наявності (2) ізоляції тильних поверхонь електродів ($U = 5$ В)

На підставі результатів попередніх досліджень для нівелювання термічного впливу струму на електропровідність суспензії забезпечували значення напруги не вище за 12 В.

Робочу поверхню електродів перед зануренням у суспензію обробляли шліфувальною шкуркою із зернистістю М40 (ГОСТ 3647) та протирали чистою ганчіркою. Саму ж суспензію ретельно перемішували до досягнення нею ізотропного стану (з консистенцією густої сметани).

Спочатку визначення електричних властивостей суспензії здійснили при варіюванні напруги у діапазоні 2...11,75 В на постійному струмі упродовж 3 хв. кожного вимірювання (до одержання стабільних показників приладів) та змінному струмі з малою (10 Гц) та значною (50...800 Гц) частотою без електроізоляції зовнішніх поверхонь електродів та з такою ізоляцією двома шарами ацетатного лаку.

Фізичну реалізацію пристрою з рис. 1, у першому наближенні, подано еквівалентною схемою заміщення на рис. 4а.

Активний електричний опір, електропровідність, питомий опір та питому електропровідність суспензії визначали за формулами (2), (1), (6) та (8) відповідно. Вимірювання напруги U здійснювали безпосередньо на клеммах електродів пристрою (див. рис. 4а), що забезпечило виведення складової опору $R_{ш}$ поза межі ділянки електричного ланцюга, що контролювався.

Результати дослідження, наведені на рис. 5 і 6, свідчать про таке.

Перш за все, зафіксований рівень питомого опору суспензії препарату ВКГС-0 на 1...2 порядки менший (що супроводжується більшим рівнем питомої електропровідності) за водо-вугільне паливо з попередньої серії досліджень. Це може бути пояснено суттєвою відповідною різницею у значеннях кількості та провідності (опору) дисперсної (32,4 % графіту у порівнянні з 65 % газового вугілля) та

дисперсійної (технічна вода з поверхнево-активними речовинами у порівнянні з очищеною водою) фаз суспензій.

Змінюється характер залежності опору (та провідності) від напруги, що може бути поясненом різним співвідношенням носіїв електричних зарядів з їх характерною рухливістю у суспензіях.

Відсутність ізоляції тильних поверхонь електродів при випробуваннях на постійному струмі занижувала питомий електричний опір суспензії в 1,35–1,7 разів і таким же чином завищувала питому електропровідність (див. рис. 5).

Реалізація вимірювань на змінному струмі навіть із частотою 10 Гц практично не супроводжувалася коагуляцією часток суспензії на електродах та суттєво зменшувала розбіжності в указаних залежностях до 2...6 %. Пояснення останнього явища може міститися у запобіганні “повільного” переносу електричних зарядів іонами та міцелами суспензії при знакозмінній напрузі. Але при цьому змінюється характер залежності параметрів, що контролюються, від напруги (див. лінії 1 і 2 на рис. 5), що може бути поясненом проявом відомого ефекту Дебая-Фалькенгагена [7] та впливом частоти f на X_c за формулою (6). Також проявляється вплив наявності (у порівнянні з відсутністю) ізоляції тильних поверхонь електродів при частотах 30...800 Гц струму (див. рис. 6). Тут фіксуються зростання значень опору та зменшення відповідної провідності в 1,15...1,18 разів.

Наведені результати свідчать, що необхідними є відповідні коригування даних, які показані раніше у роботі [1], а всі наступні такі дослідження слід виконувати за наявності указаної ізоляції та при використанні електричного струму змінної частоти. Але це зумовлює необхідність корекції уявлень щодо еквівалентної схеми вимірювань та розробки відповідного методу розрахунків.

Аналіз показав, що вдосконалена модель еквівалентної схеми вимірювань повинна одночасно

містити, окрім активного опору R , також і ємність C , що узгоджується із загальною моделлю “імпедансу Варбурга” [8]. При цьому мають бути виконаними умови щодо забезпечення в удосконаленій моделі:

- електропровідності на постійному з $f = 0$ (див. рис. 2) та змінному з $f \neq 0$ струмі;
- збереження після зняття живлення залишкового електричного потенціалу U суспензії з його зменшенням у часі τ внаслідок розряду (див. рис. 3) за допомогою деякого елемента $R_{ш}$, що “шунтує” ємність;
- зменшення імпедансу Z_{Σ} (збільшення провідності Y_{Σ}) при зростанні частоти f електричного струму (див. рис. 5 і 6);
- простоти експериментального та аналітичного визначення величин, що входять до еквівалентної схеми, зокрема, з вимірюванням напруги U саме на клеммах електродів пристрою, що виключає вплив $R_{ш}$.

За умов суттєвого проявлення ємності подвійного шару лише при частотах струму, які на декілька порядків більші [3], ніж застосовані при наявних дослідженнях, викладені міркування дозволили подати фізичну схему вимірювань еквівалентною моделлю на рис. 4б.

При такому підході слід розглядати сумарний імпеданс Z_{Σ} суспензії та імпеданс Z його складової, яка формується RC-ділянкою (а також — відповідні адмітанси), з їх характеристиками: ρ_{Σ} , Γ_{Σ} , γ_{Σ} , R , ρ , γ , X_C , ρ_C , γ_C .

Використання удосконаленої еквівалентної схеми зумовило зміну рівнянь, які визначають ці параметри.

При використанні поданої моделі слід враховувати, що значення U та сили струму I характеризують імпеданс Z_{Σ} усєї послідовно-паралельної частини схеми, що включає складові активного опору $R_{ш}$, R та реактивного опору X_C , а R та X_C визначають імпеданс Z тільки RC-ділянки, який є складовою Z_{Σ} (див. рис. 4б).

Можна прийняти, що $R_{ш}$ відповідає пунктирній лінії 1 з рис. 5а.

Тоді, з урахуванням відомого рівняння

$$\frac{1}{Z_{\Sigma}} = \frac{1}{Z} + \frac{1}{R_{ш}}$$

та формул (5) і (6), маємо

$$Z = \frac{R_{ш} \cdot Z_{\Sigma}}{R_{ш} - Z_{\Sigma}} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot C^2}}, \quad (11)$$

а невідомі R та C можуть бути розрахованими за результатами двох послідовних вимірювань сумарного імпедансу

$$Z_{\Sigma 1} = \frac{U_1}{I_1} \quad \text{та} \quad Z_{\Sigma 2} = \frac{U_2}{I_2}$$

на двох відповідних різних частотах f_1 та f_2 .

Із використанням такого підходу після простих, але громіздких перетворень системи рівнянь типу (11) одержали

$$C = \frac{(R_{ш} - Z_{\Sigma 1}) \cdot (R_{ш} - Z_{\Sigma 2})}{2\pi \cdot R_{ш}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}}{Z_{\Sigma 1}^2 \cdot (R_{ш} - Z_{\Sigma 2})^2 - Z_{\Sigma 2}^2 \cdot (R_{ш} - Z_{\Sigma 1})^2}}; \quad (12)$$

$$R = \frac{R_{ш}}{R_{ш} - Z_{\Sigma 1}} \cdot \sqrt{Z_{\Sigma 1}^2 - \frac{1}{1 - (\frac{f_1}{f_2})^2} \cdot [Z_{\Sigma 1}^2 - (Z_{\Sigma 2} \cdot \frac{R_{ш} - Z_{\Sigma 1}}{R_{ш} - Z_{\Sigma 2}})^2]}. \quad (13)$$

З урахуванням рівнянь (12) і (13) можна за формулами (7) та (9) визначити питомий активний електричний опір ρ та відповідну активну питому електропровідність γ , а за виразами (6), (8) та (10) — ρ_c та γ_c . При цьому, як було зазначено вище, слід мати на увазі, що схема на рис. 4б є лише моделлю фізичного стану суспензії, а всі вказані складові її опору (провідності) існують одночасно в одному об'ємі; активна та ємнісна складові опору (провідності) на RC-ділянці взаємопов'язані і сумісно формують величину імпедансу Z цієї ділянки. Крім того, електрична ємність суспензії може розподілятися нерівномірно між електродами, що робить її залежною від відстані між ними. Отже, фактично відокремити складові імпедансу одну від іншої неможливо. Те ж саме стосується характеристик провідності (адмітансу).

Тому для цілей аналізу (див. рис. 4б) доцільно розглядати електричні характеристики, що формують імпеданс Z на RC-ділянці та штучно відокремлену його активну та ємнісну складові R та X_C за формулами (5), (6), (12) та (13), пов'язані з ними значення ρ_Z , ρ і ρ_C , а також — відповідні параметри γ_Z , γ і γ_C , що характеризують адмітанс суспензії.

Тут одразу виникає питання щодо визначення доцільного розбігу між частотами f_1 і f_2 , а також значення частоти, якій відповідають ті чи інші значення параметрів, що досліджуються.

Спершу варіювання значень указаних частот у діапазоні 30...800 Гц здійснили з різницею в 1,66...26,6 разів між ними.

Результати експериментів та розрахунків при $U = 5$ В та відповідному значенні $R_{ш} = 145,5$ Ом (згідно з даними рис. 5а, пунктирна лінія) представлені у таблиці.

Ці дані виявили, що неможливо побудувати однозначні тренди залежностей, що шукаються, в усьому діапазоні зміни частот f_1 і f_2 та великій різниці між ними при визначенні узагальнюючої частоти за виразом

$$f_{сеп} = 0,5 \cdot (f_1 + f_2). \quad (14)$$

При цьому такі залежності частково можна визначити при зменшенні різниці між f_1 і f_2 .

Аналіз цих даних також показав, що суттєво більш впливовим фактором є менша частота f_1 з пари тих, що використані для розрахунків, при не-

Результати визначення електричних параметрів суспензії при значній різниці між частотами f_1 і f_2

f_1 , Гц	I_1 , мА	f_2 , Гц	I_2 , мА	$f_{\text{сеп}}$ (14), Гц	$f_{\text{екв}}$ (15), Гц	ρ_z , Ом*м	γ_z , (Ом*м) ⁻¹	ρ_c , Ом*м	γ_c , (Ом*м) ⁻¹	ρ , Ом*м	γ , (Ом*м) ⁻¹
30	85,9	50	87,6	40	37,5	0,298	3,351	0,076	13,112	0,289	3,466
30	85,9	100	88,5	65	46,2	0,295	3,393	0,063	15,756	0,288	3,475
30	85,9	400	90,7	215	55,8	0,286	3,502	0,066	15,099	0,278	3,600
30	85,9	800	91,2	415	57,8	0,283	3,529	0,067	15,018	0,275	3,630
50	87,6	100	88,5	75	66,7	0,291	3,433	0,046	21,594	0,288	3,477
50	87,6	400	90,7	225	88,9	0,283	3,534	0,055	18,310	0,278	3,601
50	87,6	800	91,2	425	94,1	0,281	3,561	0,055	18,216	0,275	3,631
100	88,5	400	90,7	250	160,0	0,282	3,547	0,052	19,334	0,277	3,608
100	88,5	800	91,2	450	177,8	0,280	3,574	0,050	20,001	0,275	3,633
400	90,7	800	91,2	600	533,6	0,277	3,616	0,032	31,357	0,275	3,641

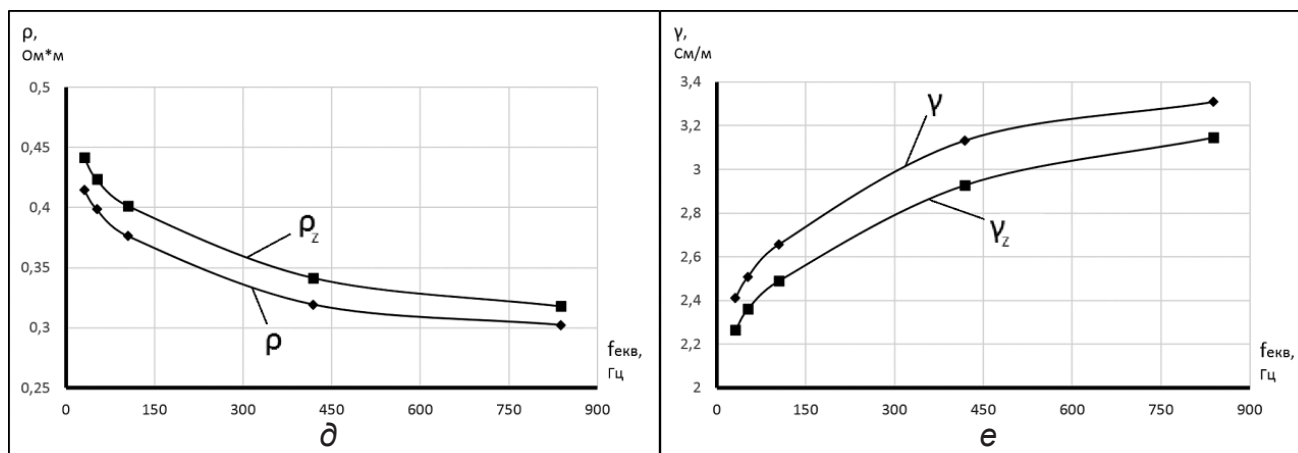
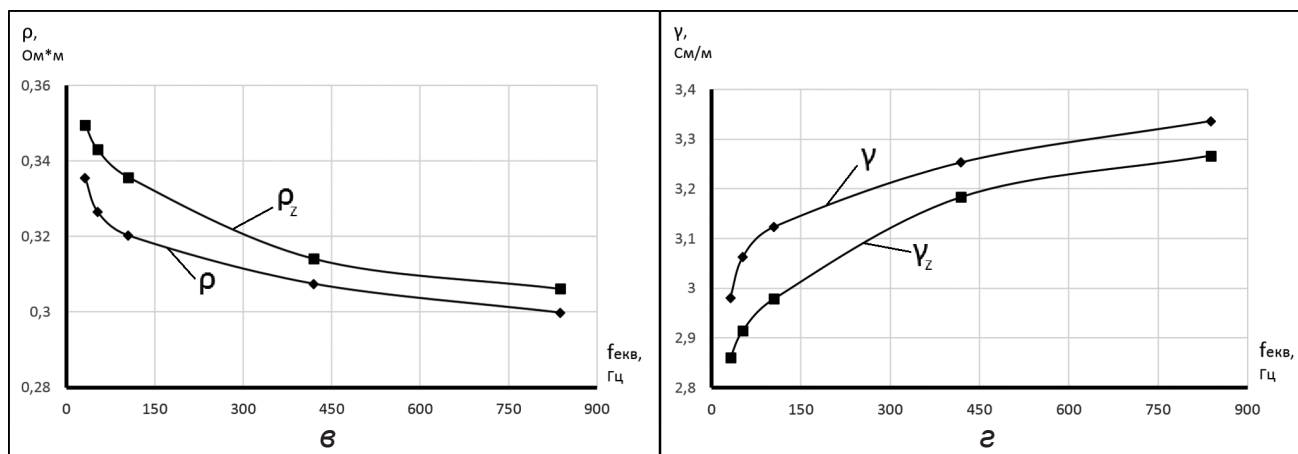
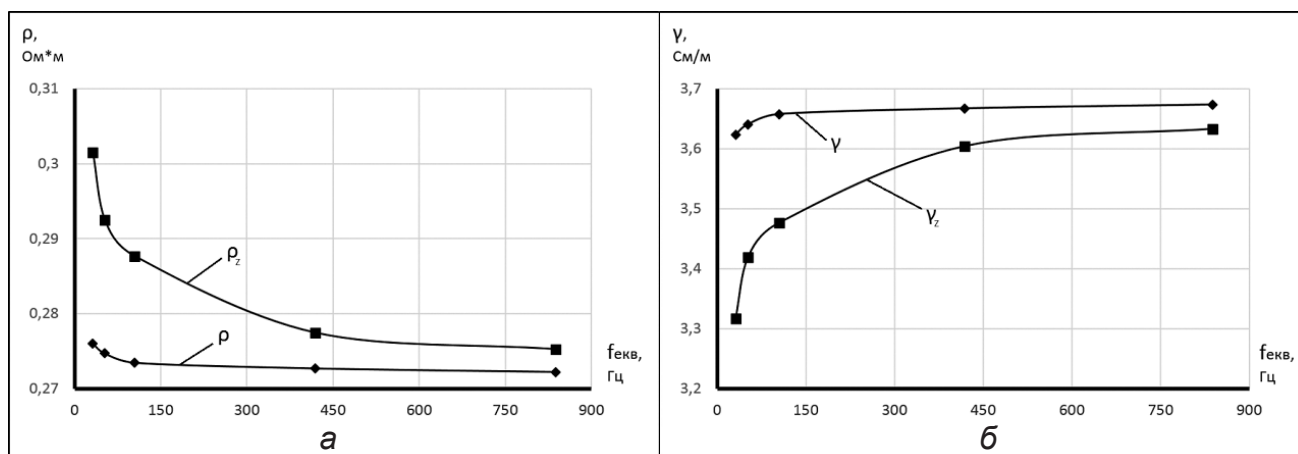


Рис. 7. Залежність питомого опору (а) RC-ділянки ρ_z та її активної складової ρ , а також питомої провідності (б) суспензії ВКГС-0 з відповідними складовими γ_z та γ від еквівалентної частоти $f_{\text{екв}}$ при значеннях напруги 5; 2,5 та 1 В

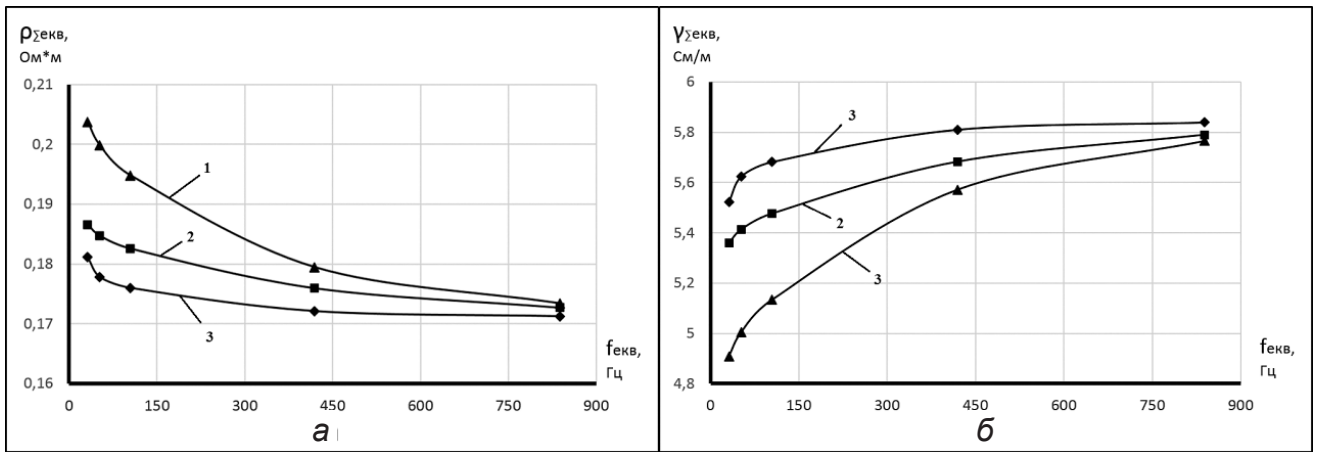


Рис. 8. Залежність від частоти $f_{екв}$ питомого опору $\rho_{екв}$ (а) та питомої провідності $\gamma_{екв}$ (б) для всієї суспензії ВКГС-0 при значеннях напруги $U = 1$ В (1); 2,5 В (2); 5 В (3)

значному впливі більшої f_2 із частот. З урахуванням цих міркувань, узагальнюючу “еквівалентну” частоту визначили за формулою середньої зваженої оцінки:

$$f_{екв} = f_1 \cdot \left(1 - \frac{f_1}{f_1 + f_2}\right) + f_2 \cdot \frac{f_1}{f_1 + f_2}, \quad (15)$$

що дозволило отримати, здебільшого, монотонні залежності параметрів ρ_z , ρ , ρ_c , γ_z , γ і γ_c від $f_{екв}$.

Аналіз виразу (15) показав, що при $f_1 = f_2 = f$ він дає: $f_{екв} = f$. Зі скороченням різниці між f_1 та f_2 зменшується вплив певної штучності цього виразу на достовірність аналізу. При близьких значеннях f_1 і $f_1 f_{екв} \rightarrow f_{сеп}$.

Суттєвим також уявляється те, що за даними таблиці як імпеданс, так і його активна та ємнісна складові по-різному залежать від частоти електричної напруги.

Наслідком із цього стала рекомендація зближувати при дослідженнях значення f_1 та f_2 таким чином, щоб можна було без суттєвої похибки вважати: $f = f_{екв}$.

Також доцільним виявилось дослідження впливу напруги на залежності, що вивчаються. Такі розрахунки виконали для рівнів напруги $U = 5; 2,5$ та $1,0$ В. При цьому враховували, що значення шунтуючого опору $R_{ш}$ (див. рис. 4б) самі залежать від U і згідно з даними рис. 5 становили 145,5; 128 та 121 Ом відповідно.

Результати розрахунків, наведені на рис. 7, свідчать про таке.

Звуження діапазону пар частот електричного струму для визначення електричних властивостей суспензії дозволяє подати результати у вигляді залежностей, суттєво підвищує стабільність результатів та достовірність аналізу. Але при цьому зменшується різниця між виміряними значеннями I_1 та I_2 струму, що вимагає використання вимірювальних приладів із необхідним класом точності.

Збільшення частоти f зумовлює зменшення як питомого опору ρ_z всієї RC-ділянки еквівалентної схеми (див. рис. 4б), так і її активної складової ρ , а також — відповідне збільшення значень пи-

томої провідності γ_z та γ . Останнє узгоджується з відомим ефектом Дебая-Фалькенгагена [7] навіть в указаному діапазоні частот. Інтенсивність зміни указаних залежностей помітно зменшується після $f_{екв} > 100 \dots 150$ Гц.

Аналіз наведених даних також свідчить про вплив напруги живлення на результати визначення характеристик імпедансу Z_{Σ} і адмітансу Γ_{Σ} за формулою (1) усієї схеми вимірювань за умов незначних тепловиділень у суспензії не тільки на постійному струмі (див. рис. 2 для водо-вугільної суспензії), але й на змінному (див. рис. 7 для суспензії ВКГС-0).

Це доводиться результатами експериментального визначення залежності імпедансу та адмітансу суспензії ВКГС-0, які наведено на рис. 8, з використанням формул (3), (7) і (9).

Слід враховувати, що відомості, принаймні якісні, щодо значень ємнісних властивостей суспензій можуть виявитися корисними для практичних умов її застосування.

Але при цьому, як уже було відзначено вище, параметри, які пов'язані з ємністю, характеризують не тільки властивості самої рідини, але й особливості оснащення для вимірювання її ознак.

Отже, приведені дані, з урахуванням формули (5), дозволяють розрахувати значення ємнісного опору:

$$X_c = \sqrt{Z^2 - R^2},$$

а за формулами (8) і (10) — величини питомого ємнісного опору ρ_c та питомої ємнісної провідності γ_c .

Зменшення розбіжності між значеннями ρ_z та ρ на рис. 7 свідчить про зменшення ємнісної складової імпедансу (та адмітансу) зі збільшенням частоти $f_{екв}$, а також — про відповідне збільшення провідності γ_c (рис. 9).

Тут, на відміну від даних щодо залежності активної складової імпедансу (та адмітансу) від частоти та напруги, фіксується більша залежність ємнісної складової від цих параметрів: 1,55 рази при напрузі 1 В та 2,4 рази при напрузі 5 В у діапазоні зміни частоти 30...840 Гц.

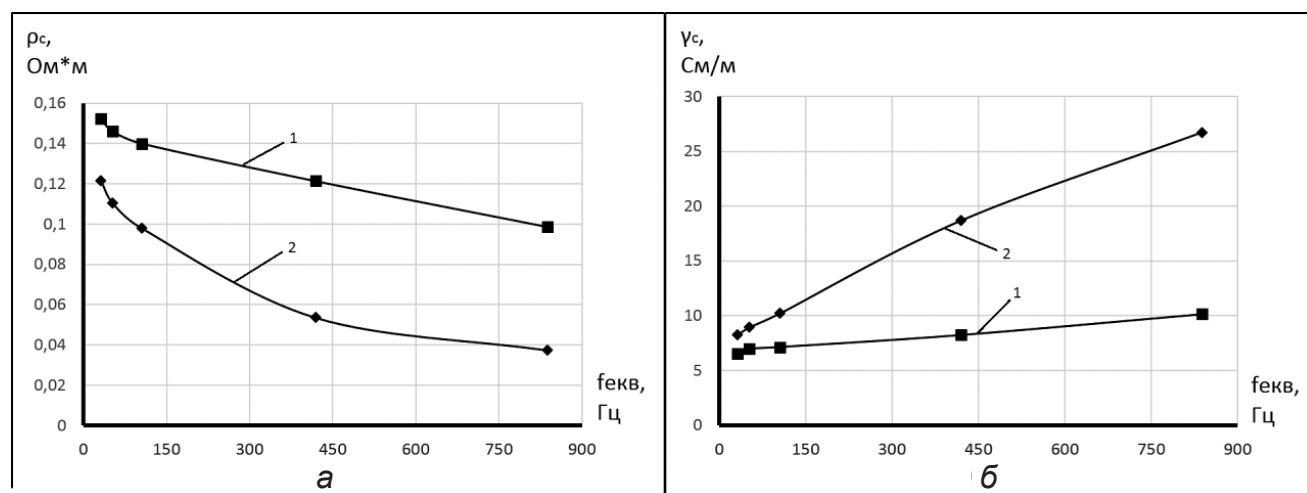


Рис. 9. Залежність питомої ємнісної складової опору ρ_c (а) та відповідної питомої провідності γ_c (б) суспензії ВКГС-0 від частоти струму: при напрузі 1 В (1) та 5 В (2)

При цьому основна зміна відбувається при частоті, меншій за 100...150 Гц. Останнє зумовлює рекомендацію проводити вимірювання при частоті, більшій за указаний діапазон з урахуванням частотних характеристик вимірювальних пристроїв. З наведених даних видно, що зі збільшенням частоти струму від приблизно 30 до 840 Гц (тобто в 28 разів) та зростанням напруги U з 1 до 5 В питомий опір ρ_c суспензії зменшується у 2–4 рази. Вплив частоти в указаному діапазоні на зменшення опору становить приблизно 1,06 разів при напрузі $U = 5$ В, 1,08 разів при $U = 2,5$ В і 1,18 разів при $U = 1,0$ В.

Ймовірно, останнє пов'язане з тепловиділенням при проходженні електричного струму крізь суспензію. Це зумовлює рекомендацію здійснювати вимірювання при значеннях електричної напруги та відповідного струму, які не викликають помітного додаткового нагріву суспензії відносно умов навколишнього середовища.

Якщо ж урахувати прямий зв'язок між питомим ємнісним опором ρ_c та ємнісним опором X_c за формулою (8) та зворотний зв'язок між X_c та ємністю C і частотою f за формулою (6), можна стверджувати, що експериментально зафіксоване зменшення ємності суспензії пов'язане, переважно, зі збільшенням частоти струму в порівнянні із впливом напруги U . Відповідним чином можна розглядати вплив f та U на електричну провідність суспензії.

На підставі всіх наведених матеріалів дослідження, для визначення електричних властивостей суспензій можна рекомендувати такий порядок дій (методику).

1. Визначити склад суспензії, електричні характеристики якої мають бути дослідженими.

2. Зібрати оснащення та вимірювальний ланцюг за схемою на рис. 4 з ретельною електроізоляцією тильних поверхонь електродів. Обрати вимірювальні прилади з урахуванням їхнього класу точності. Відстежити температуру випробувань (доцільно

забезпечити її приблизно рівною температурі потенційного використання суспензії, при якій буде здійснюватися електромагнітна обробка указаної рідини).

3. При певному рівні напруги провести вимірювання сили постійного електричного струму $I_{пост}$, який би не викликав помітного підвищення температури суспензії, з фіксацією остаточного стабільного результату, що практично не змінюється у часі (зокрема, в умовах наведених досліджень $U = 2,5...5$ В, а час відстеження 150...200 с).

4. Розрахувати значення шунтуючого опору $R_{ш}$ за формулою (2) та відповідного питомого опору $\rho_{ш}$ за формулою (7).

5. Провести вимірювання значень сили електричного струму I_1 та I_2 при відповідних частотах, що відрізняються одна від одної не більше як на 10 % та зумовлюють різницю $|I_1 - I_2|$, яку можна достовірно визначити з урахуванням класу точності (за п. 2) та частотного діапазону працездатності вимірювальних приладів (наприклад, при $f_1 = 300$ Гц; $f_2 = 330$ Гц). Результати фіксувати після їх стабілізації.

Дослідження повторити кілька разів (мінімум, 5) так, що знівелювати випадкову помилку вимірювань. Для наступних розрахунків використовувати середні значення вимірювань.

6. За даними п. 5 розрахувати електричні характеристики суспензії:

- імпеданси $Z_{\Sigma 1}$ і $Z_{\Sigma 2}$ (та адмітанси $Y_{\Sigma 1}$ і $Y_{\Sigma 2}$) за формулами (3) і (4) відповідно;

- еквівалентний імпеданс $Z_{\Sigma экв}$ з діапазону частот f_1 та f_2 за формулою

$$Z_{\Sigma экв} = Z_{\Sigma 1} \cdot \left(1 - \frac{f_1}{f_1 + f_2}\right) + Z_{\Sigma 2} \cdot \frac{f_1}{f_1 + f_2};$$

- еквівалентний питомий імпеданс $\rho_{\Sigma экв}$ та еквівалентний питомий адмітанс $\gamma_{\Sigma экв}$ за формулами (7) та (9), які відповідають частоті $f_{екв}$ за формулою (15);

- активну складову R імпедансу за виразом (13) та відповідне значення питомого активного опору ρ за формулою (7), а також зіставні значення провідності Y та γ , що зіставляються за формулами (3) та (9);

- ємність C за рівнянням (12), ємнісну складову імпедансу X_C за формулою (6) та питомий реактивний (ємнісний) опір ρ_C за формулою (8);

- питому ємнісну електропровідність γ_C , що відповідає ρ_C , за виразом (10).

7. Зафіксувати всі дані у протоколі дослідження.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Удосконалено оснащення щодо визначення електричних властивостей суспензій (активної та ємнісної складових імпедансу та адмітансу) на прикладі суспензії технологічного мастила ВКГС-0, що містить дрібнодисперсний графіт як дисперсну фазу, у порівнянні з водо-вугільною суспензією подрібненого газового вугілля.

Виявлено та кількісно оцінено вплив складу суспензії, особливостей схеми вимірювання, виду електричного струму (постійний або змінний), напруги та її частоти на електричні характеристики суспензій.

Завдяки використанню вдосконаленої схеми заміщення реального процесу вимірювань та відповідної розрахункової моделі із застосуванням експериментальних результатів двох вимірювань на двох близьких частотах струму визначено рівні активної та ємнісної складових в імпедансі (адмітансі) суспензії ВКГС-0.

Визначено умови, при яких дестабілізуючий вплив зовнішніх факторів на електричні властивості суспензій є мінімальним, що дозволило конкретизувати доцільні умови проведення випробувань для підвищення достовірності результатів експериментів.

На підставі проведених досліджень розроблено вдосконалений метод та представлено відповід-

ну методику визначення електричних властивостей суспензій.

Викладені матеріали можуть бути корисними при визначенні електричних властивостей інших суспензій, а також інших гетерогенних систем, зокрема, емульсій для їх застосування в умовах, де є потреба в електромагнітному впливі на відповідні рідини.

Список літератури

1. Пинчук В., Должанский А. Исследование электрических свойств водоугольной суспензии // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: зб. наук. праць. Дніпропетровськ: ЛИРА ЛТД, 2013. Вип. 5. С. 171–180.
2. Духин С.С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. Київ: Наукова думка, 1975. 248 с.
3. Духин С., Шилов В. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах. Київ: Наукова думка, 1975. 246 с.
4. Столярчук П., Шпак О., Янович Р. Результати експериментальних досліджень показників якості дизельного палива і рослинної олії електричним методом // Вимірювальна техніка та метрологія. Львів: "Львівська політехніка". 2012. № 73. С. 136–142.
5. Мартинович Н., Походило Є. Використання імітансного методу для контролю твердості води // Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. 2011. № 26. С. 45–48.
6. Two Channels Frequency Generator [Электронный ресурс]. URL: http://www.cognaxon.com/index.php?page=download_educational
7. Вишняков А.В. Физическая химия: учебник для вузов. Москва: Химия, 2012. 840 с.
8. Стойнов З.Б., Графов Б.М., Савова-Стойнова Б., Елкин В.В. Электрохимический импеданс. Москва: Наука, 1991. 336 с.