



**Методи і прилади вимірювання
витрати рідкої і газоподібної фаз**

Прийнято 28.02.2026. Прорецензовано 30.04.2026. Опубліковано 30.05.2026.

УДК 697.85537.36:681.586.74:53.089

DOI: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-88-103

**НАУКОВІ ЗАСАДИ ГЕНЕРАЦІЇ ВІДТВОРЮВАНИХ ЗНАЧЕНЬ
ПОТЕНЦІАЛУ ПРОТІКАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІДИН
КАПІЛЯРНИМИ ПЕРВИННИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ**

Козак О. Ф.

Кандидат технічних наук, старший викладач

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

76019, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна,

<https://orcid.org/0009-0008-5663-4295>

e-mail: oleksii.kozak@nung.edu.ua

Анотація. У статті розроблено та експериментально обґрунтовано наукові засади генерації відтворюваних значень потенціалу протікання технологічних рідин капілярними первинними перетворювачами для задач експрес-контролю їх якості в нафтогазовій і суміжних галузях. Актуальність дослідження зумовлена обмеженнями традиційних методів визначення якісних показників технологічних рідин, зокрема вмісту в них води, щодо оперативності, вартості і придатності до автоматизації. Метою роботи є встановлення кількісно обґрунтованих критеріїв вибору геометричних параметрів прямого капіляра на основі аналізу та узагальнення фізичної і математичної моделей електрокінетичного явища потенціалу протікання. У роботі системно пов'язані умови формування відтворюваних значень потенціалу протікання з параметрами гідродинамічної подібності течії, зокрема критерієм Рейнольдса, та геометричними характеристиками капіляра. Встановлено, що відтворювані значення потенціалу протікання формуються за умов гідродинамічної подібності течій і забезпечення достатньої довжини капіляра, яка перевищує довжину ділянки гідродинамічної стабілізації не менш ніж у (1,2–1,5) рази. Обґрунтовано доцільність використання капілярів із радіусом, більшим за товщину подвійного електричного шару, що дозволяє зменшити вплив поверхневої провідності і забезпечити стабільність результатів вимірювань. Запропоновано гіпотезу про існування трьох характерних ділянок течії рідини в капілярі – гідродинамічної стабілізації, електрокінетичної стабілізації та усталеного режиму генерації потенціалу протікання. Отримані результати створюють науково обґрунтовану основу для вдосконалення інформаційно-вимірювальних систем експрес-контролю якості технологічних рідин за методом потенціалу протікання шляхом оптимізації геометричних і гідродинамічних параметрів капілярних первинних перетворювачів, що забезпечує підвищення відтворюваності, точності та надійності вимірювань.

Ключові слова: електрокінетичні явища; подвійний електричний шар; експрес-контроль якості; ламінарна течія; гідродинамічна подібність.

Запропоноване посилання: Козак, О. Ф. (2026). Наукові засади генерації відтворюваних значень потенціалу протікання технологічних рідин капілярними первинними перетворювачами. *Методи та прилади контролю якості*, 1(56), 88-103. doi: 10.31471/1993-9981-2026-1(56)-88-103

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Вступ

Переважає більшість технологій нафтогазової галузі – від технологій буріння та освоєння свердловин, інтенсифікації нафтогазовилучення, промислової підготовки нафти і природного газу до технологій трубопровідного транспорту та зберігання вуглеводневої продукції – у ході їхньої реалізації потребують оцінки якісних показників різноманітних технологічних рідин.

Так, наприклад, бурові промивальні розчини повинні відповідати одночасно багатьом вимогам: сприяти руйнуванню порід, очищати вибій і транспортувати на поверхню вибурену породу, унеможливити осадження уламків породи у стовбурі свердловини, попереджувати нафтогазопроявлення, зберігати природні фільтраційні властивості порід-колекторів, зберігати міцність стінок свердловини, не викликати корозію бурильної колони та бурового обладнання, відрізнитися нетоксичністю, пожегобезпечністю з урахуванням вимог до охорони праці і довкілля та ін. [1]. Усе це вимагає надійного і своєчасного контролю якісних показників бурових розчинів та недопущення відхилення їх від проєктних значень, що, враховуючи викладені вимоги, є справою не тільки складною і громіздкою, але й надзвичайно відповідальною з причин важких наслідків можливих аварій під час буріння нафтових та газових свердловин.

У процесі розробки нафтових родовищ настає період, коли з пласта разом із нафтою надходить вода. Під час первинної підготовки нафти на промислах для створення умов безаварійного транспортування нафту зневоднюють, знесолюють і стабілізують. Зневоднення нафти – найбільш трудомістка та затратна стадія промислової підготовки, що зумовлено високою стійкістю нафтових емульсій. Технологічний процес зневоднення контролюється, в основному, аналізами на вміст води в нафтових емульсіях [2].

Значна кількість вимірювань якісних показників технологічних рідин припадає на стадію промислової стабілізації нафти й газового конденсату та підготування до транспортування трубопроводами природ-

ного і супутнього нафтового газів, де застосовуються процеси ректифікації, абсорбції та адсорбції [3, 4, 5].

Вимірювання великої кількості якісних показників рідин здійснюється з метою контролю охорони довкілля, дотримання санітарних норм у процесах промислового очищення і відведення стічних вод, знешкодження та відведення різноманітних виробничих технологічних рідин компресорних і нафтоперекачувальних станцій, установок підготовки газу, підземних сховищ газу, резервуарних парків зберігання нафти та продуктів її переробки тощо. Більшість зазначених вимірювань пов'язані з визначенням вмісту води в технологічних рідинах або вимірюваннями вмісту у воді нафти, продуктів її переробки, гліколів, метанолу, етанолу, сірководню, меркаптанів, ароматики й інших сполук [4, 5, 6].

Визначення якісних показників речовин та оцінка їх відповідності нормативним значенням, у першу чергу вмісту (концентрації) і складу речовин, широко використовується для контролю технологічних процесів не тільки в нафтогазовій, а й у нафтогазопереробній, геологічній, хімічній, біологічній, медичній, харчовій та інших галузях.

Підсумовуючи усе вищевказане, можна зробити наступні висновки:

- у нафтогазовій галузі завдання визначення відповідності якісних показників технологічних рідин нормативним є невід'ємною складовою реалізації та керування різноманітними технологічними процесами буріння свердловин, видобування, транспортування і зберігання вуглеводневої продукції;

- виконується великий об'єм вимірювань із визначення вмісту води в технологічних рідинах.

Таким чином, задача розроблення і впровадження нових методів та засобів експрес-контролю якості технологічних рідин, у тому числі й з використанням властивостей окремих фізичних явищ у середовищі таких рідин, є безумовно актуальною.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Велика множина речовин, кількісний склад яких підлягає оцінці, широкий діапазон вимірюваних концентрацій, значна складність і відмінність в умовах вимірювання зумовили створення багатьох різноманітних методів та приладів для реалізації зазначеної задачі [7, 8, 9], які певною мірою систематизовані автором і відображені на рис. 1.

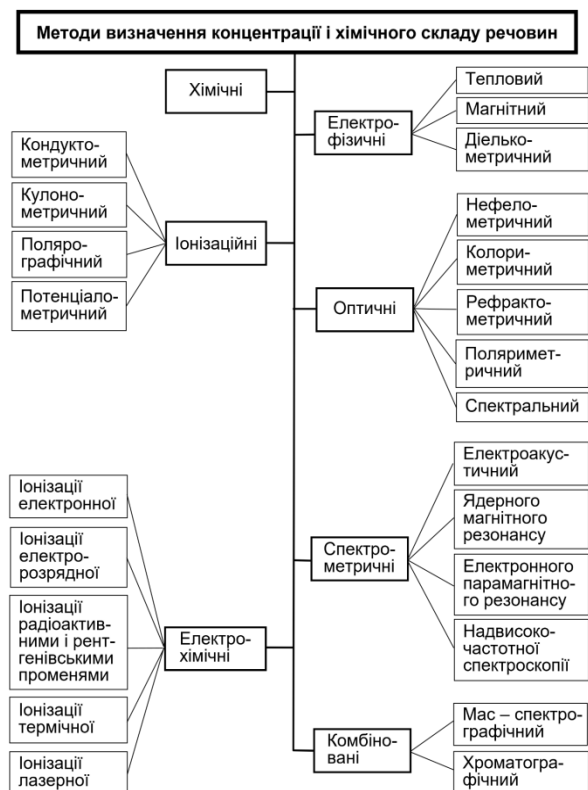


Рисунок 1 – Класифікація найбільш поширених методів визначення концентрації і хімічного складу речовин

Стосовно методів та засобів контролю якості технологічних рідин, зокрема, для визначення в них вмісту води, то не всі методи, що внесені до класифікаційної схеми на рис. 1, придатні для цього або відповідають у повній мірі вимогам експрес-контролю. У цій сфері найбільшого поширення набули хімічні, електрохімічні, дієлькометричний і хроматографічний методи, кожен із котрих має окремі переваги та недоліки. У більшості випадків вказані методи і засоби або трудомісткі чи довготривалі, або дорогі та непридатні для експрес-контролю [6, 10, 11].

Щодо нових методів контролю якості технологічних рідин слід відзначити не використані саме в цьому плані можливості електрокінетичних явищ і, серед них, явища потенціалу протікання. За останні 20-30 років опубліковано низку наукових праць, присвячених потенціалу протікання, у різних галузях науки – від геофізики до мікробіології й медицини – а також у практичних технологічних сферах, таких як видобування нафти і газу. Зокрема, явище потенціалу протікання використовується в наукових дослідженнях як метод оцінки окремих якісних показників технологічних рідин, особливо з властивостями електролітів [12, 13, 14].

Висвітлення невіршених раніше частин загальної проблеми

Фізичні та математичні моделі явища потенціалу протікання остаточно не сформовані і продовжують у наш час досліджуватися [15, 16, 17]. Теорія ще не дала відповіді на важливі питання – яке значення діелектричної проникності (розчину чи розчинника) слід використовувати в розрахунках різноманітних характеристик і показників цього електрокінетичного явища, як точно враховувати поверхневу провідність та аномальні властивості рідини в нерухомому пристінному шарі, дискретність зарядів на поверхні, вплив шорсткості поверхні, чому під час дослідження генерація відтворюваних результатів, як і для інших електрокінетичних явищ, супроводжується певними труднощами та які наукові передумови цього й ін. Викладене не претендує на всю повноту тенденцій розвитку теорії подвійного електричного шару та явища потенціалу протікання, але засвідчує її незавершеність.

Також теоретичним чи експериментальним шляхом необґрунтовані і несформульовані в завершеному вигляді принципи вибору та визначення основних геометричних характеристик важливого елемента вимірної комірки пристрою експрес-контролю – первинного перетворювача потенціалу протікання (ПП), який забезпечує генерацію потенціалу протікання контролюваної технологічної рідини. У раніше

виконаних автором дослідження серед іншого зазначена задача частково розглядалася [18]. Наступні роботи з удосконалення інформаційно-виміральної системи для контролю якості абсорбентів показали, що ПП із тонкопоровим середовищем порівняно з прямими капілярами більш чутливі до забруднень твердими мілко дисперсними складниками, які змінюють гідродинамічні та електрокінетичні характеристики ПП, і тому вимагають попереднього ретельного фільтрування контрольованої технологічної рідини та частого промивання. При цьому повністю поновити гідродинамічні й електрокінетичні характеристики ПП у вигляді пористих перегородок тільки промиванням не завжди вдається. З урахуванням того, що прямі капіляри відрізняються простою конструкцією, надійні і дешевші, доцільно продовжити дослідження в цьому напрямку.

Формулювання цілей статті

За аналізом фізичної і математичної моделі явища потенціалу протікання експериментально обґрунтувати базові положення щодо визначення геометричних характеристик одного з найбільш простих за конструкцією ПП – прямого капіляра як елемента вимірної комірки потенціалу протікання. Результати зазначених теоретичних та експериментальних досліджень слугуватимуть основою удосконалення пристрою експрес-контролю якості технологічних рідин за потенціалом протікання.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Основні аспекти фізичної моделі явища потенціалу протікання наступні. Під час руху полярної рідини або розчину електроліту під дією різниці тисків через капіляр чи пори капілярної системи завдяки наявності подвійного електричного шару виникає різниця потенціалів $\Delta\phi$.

Гетерогенні системи завжди прагнуть до зменшення поверхневої енергії, що зумовлює певну орієнтацію полярних молекул, іонів у поверхневому шарі. Внаслідок цього фази, які дотикаються, набувають зарядів протилежного знаку, але рівних за

величиною, і на поверхні розділу утворюється подвійний електричний шар. Знак і величина заряду та міжфазна різниця потенціалів залежать від природи поверхні і рідини. Вільними частинками, котрі переносять заряди в рідині, є іони, тому подвійний електричний шар на межі розділу твердої і рідкої фаз має іонну природу. Якщо у формуванні подвійного електричного шару не приймають участі електроліти, то для визначення знаку заряду поверхні можна скористатися правилом Кена [19]: під час контактування двох фаз позитивно заряджається та фаза, що має більшу діелектричну проникність. Багато твердих речовин під час контактування з водою, яка має більшу діелектричну проникність, заряджаються негативно, що свідчить на користь правила Кена.

Будова подвійного електричного шару має аналогію з будовою плоского конденсатора:

- шар молекул чи іонів рідини, що прилягають до твердої поверхні, є нерухомим, тоді як наступні шари рідини – рухаються ламінарно;
- поверхня твердого тіла є ізолятором, а рідина має властивості електролітичної провідності;
- потенціал пристінного шару рідини ψ зменшується від ψ_s на твердій поверхні до нуля в межах його товщини;
- накладена ззовні різниця потенціалів сумується з ψ_s як адитивна величина.

При цьому важливо акцентувати увагу на наявності саме ламінарного режиму руху рідини, а не турбулентного, про що піде мова далі.

Наведена модель подвійного електричного шару в наш час продовжує вдосконалюватися шляхом ускладнення, а найбільш використовуваною є модель Штерна – Грема [19]. Зазначена модель враховує, окрім енергії кулонівської взаємодії, енергію специфічної адсорбції іона та його розміри і передбачає наявність у середовищі рідини двох щільних шарів та дифузного, рухомого шару.

У щільному нерухомому шарі безпосередньо з поверхнею твердого тіла контак-

тують специфічно адсорбовані іони (аніони або катіони), які частково дегідратовані або десольватовані з боку поверхні. Площина, на якій локалізуються електричні центри зазначених іонів, утворює внутрішню площину Гельмгольца. Товщина цього адсорбційного шару дорівнює радіусу іонів, що утворюють його, і сягає до 0,2 нм [19].

Наступний нерухомий щільний шар утворюють головним чином гідратовані чи сольватовані протиіони. Через електричні центри зазначених протиіонів проходить зовнішня площина Гельмгольца. Полярні молекули розчинника, орієнтовано розташовані мономолекулярним шаром на поверхні твердого тіла, унеможливають безпосередній контакт поверхні з протиіонами і тому останні, маючи ще й сольватне оточення, не можуть розряджатися на поверхні. Зовнішня площина Гельмгольца – площина ковзання є межею, до якої можуть наблизитися електричні центри іонів дифузного, рухомого шару завдяки тепловому рухові і під дією електростатичних сил. Відстань між внутрішньою та зовнішньою площинами Гельмгольца залежить від радіусів аніонів і катіонів, розмірів молекул розчинника та складає за Ньюменом і Кереном [19] біля 0,2 нм. Тобто, орієнтована загальна товщина щільної частини подвійного електричного шару є меншою за 1 нм.

Таким чином, у просторі між поверхнею твердого тіла та розчином є ніби три послідовно з'єднаних конденсатори: електростатична ємність простору між твердим тілом і внутрішньою площиною Гельмгольца, електростатична ємність простору між двома площинами Гельмгольца та ємність дифузного шару. Якщо різниця потенціалів між поверхнею твердого тіла і зовнішньою площиною Гельмгольца складає, наприклад, 0,005 В, то при товщині такого шару в 0,4 нм, напруженість електричного поля сягатиме при цьому $1,25 \cdot 10^5$ В/см. Природним є припущення, що за такої високої напруженості електричного поля повинні змінюватися деякі фізичні і хімічні властивості речовин. Саме тому діелектрична проникність розчинника в адсо-

рбційному шарі в десятки разів менша за її величину в ядрі рідини, бо в цьому шарі молекули розчинника надзвичайно сильно орієнтовані. У дифузному шарі напруженість електричного поля значно менша, а тому діелектрична проникність складає приблизно таку ж величину, що й в об'ємі рідини.

Зміна потенціалу ψ по нормалі до поверхні в межах щільних шарів приймається лінійною. У межах аналізованої моделі місце площини ковзання, котра реально розділяє в рідині щільну та дифузну частини, до цього часу чітко не визначене, але загалом площину ковзання слід розглядати саме в дифузному шарі [19]. Потенціал на площині ковзання отримав назву ζ (дзета) потенціалу.

Електропровідність розчину в капілярах чи порах капілярної системи, особливо в тонких порах, є більшою за електропровідність необмеженого об'єму розчину за рахунок надлишкових іонів подвійного електричного шару. Це явище, що називається поверхневою провідністю, у тонкопорових капілярних системах є настільки істотним, що визначення ζ – потенціалу без його врахування в багатьох випадках втрачає будь-який зміст.

Отже, за ламінарного режиму руху розчину електроліту в капілярі або пористому середовищі під впливом створеного ззовні градієнта тиску згідно з розглянутою фізичною моделлю течія рідини в капілярі зміщує іони дифузної частини подвійного електричного шару і виносить в напрямку руху течії надлишок іонів одного знаку так, що вздовж поверхні капіляра виникає стаціонарний конвективний потік вказаних іонів. Завдяки конвективному потоку іонів між торцевими перерізами капіляра виникає різниця потенціалів вздовж осі капіляра й обумовлене цією різницею потенціалів відповідне електричне поле. Воно породжує вторинний, об'ємний електроміграційний потік іонів, що направлений протилежно відносно конвективного. Різниця потенціалів буде зростати до тих пір, поки конвективний струм не зрівняється за абсолютним значенням із елект-

роміграційним струмом. Після цього зростання кількості зарядів біля вхідного та вихідного перерізів капіляра припиниться і досягнеться стаціонарне значення різниці потенціалів, яке називають потенціалом протікання. За стаціонарних умов система має стан електронейтральності, загальний струм у капілярі дорівнює нулю, а потенціал протікання зберігає сталі значення.

Математична модель явища потенціалу протікання може бути подана у вигляді системи з трьох диференціальних рівнянь [19, 20]. Для прямого довгого, тонкого циліндричного капіляра з безлічі подібних йому капілярів пористого середовища у випадку нестисливого бінарного симетричного (1:1) електроліту зазначена система рівнянь у циліндричних координатах r, x виглядає так:

рівняння загального електричного струму в капілярі –

$$2\pi \cdot \rho_e(r) \cdot w_x(r) \cdot r \cdot dr + 2\pi \cdot \gamma \cdot E_x \cdot r \cdot dr = 0, \quad (1)$$

рівняння Пуассона –

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -\frac{\rho_e}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}, \quad (2)$$

модифіковане рівняння Нав'є-Стокса –

$$\mu \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{dw_x}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} + \rho_e \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad (3)$$

де ρ_e – об'ємна густина зарядів, Кл/м³;

w_x – швидкість рідини за умов стаціонарності течії, м/с;

γ – електропровідність рідини, См/м;

$E_x = -(\partial \phi / \partial x)$ – напруженість електричного поля в напрямку x , В/м;

$\phi = \psi(r) + \phi_0 - x \cdot E_x$ – електричний потенціал за принципом суперпозиції, В;

$\psi(r)$ – потенціал подвійного електричного шару в рівноважному стані в нерухомій рідині, В;

$\varepsilon, \varepsilon_0$ – діелектричні проникності рідини та вакууму;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па·с;

$\partial p / \partial x$ – градієнт тиску, Па/м.

Граничними умовами системи (1)-(3) є: коли $r = R$, то $\psi = \psi_s$ (ψ_s – потенціал подвійного електричного шару на внутрі-

шній стінці капіляра), а $w_x = 0$; коли $r = 0$, то $(d\psi/dr) = 0$ і $(dw_x/dr) = 0$; R – радіус капіляра.

Розв'язок цієї системи диференціальних рівнянь у деталях наведений у працях автора [20, 21], а одержані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. Товщина дифузної частини подвійного електричного шару δ дорівнює:

$$\delta = \left(\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot k \cdot T}{2 \cdot e^2 \cdot z^2 \cdot n_\infty} \right)^{0,5}, \quad (4)$$

де k – стала Больцмана, Дж/К;

T – абсолютна температура електроліту, К;

e – елементарний заряд електрона, Кл;

n – вміст іонів валентності z у виділеному для дослідження об'ємі.

Для сильно розбавлених розчинів значення δ згідно з формулою (4) набагато більші за розміри молекул та іонів. Наприклад, для симетричного одновалентного розчину електроліту з концентрацією $c = 10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-5}$ кмоль/м³ ($n_i = c_i N_A$, де $N_A = 6,022 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹ – число Авогадро) при $\varepsilon = 81$, $T = 293$ К δ приймає значення відповідно 1, 10 та 100 нм при орієнтовній загальній товщині щільної частини подвійного електричного шару, як зазначалося вище, до 1 нм.

Чим більша концентрація електроліту, чим вищий заряд протиіонів, тим нижчий рівень дифузності подвійного шару і тим менша частка загального падіння потенціалу відповідає саме дифузному шару. Це дає можливість, за аналогією з іонною атмосферою Дебая-Гюккеля [19], характеризувати товщину подвійного електричного шару величиною дебаєвського радіуса екранування $\kappa^{-1} = \delta$.

Підвищення концентрації розчину електроліту призводить до зменшення товщини дифузного шару, причому здатність іонів стискувати його зростає зі збільшенням їхньої валентності. Підвищення температури збільшує інтенсивність теплового руху іонів, що спричиняє розмивання дифузного шару та зростання його товщини. Збільшення діелектричної проникності роз-

чинника зумовлює підвищення міри дисоціації електролітів і відповідне збільшення товщини дифузного шару.

Таким чином, кількісно оцінені співвідношення і порядок значень товщин щільної та дифузної частин подвійного електричного шару в рідині.

2. Залежність швидкості рідини електроліту в капілярі w_x від радіуса r для усталеної стаціонарної течії за малих значень критерію Рейнольдса описується рівнянням [21]:

$$w_x(r) = \frac{G_x}{4 \cdot \mu} (R^2 - r^2) - \quad (5)$$

$$-E_x \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Psi_s}{\mu \cdot y^0(\alpha \cdot R)} \cdot (y^0(\alpha \cdot R) - y^0(\alpha \cdot r)),$$

де градієнт тиску рідини в капілярі для спрощення запису позначено $G_x = -(dp/dx)$;

$E_x = -(\partial\varphi/\partial x)$ – напруженість електричного поля в напрямку x , В/м, що є сталою величиною за умови стаціонарності течії електроліту.

Перший член правої частини рівняння (5) засвідчує параболічний характер зміни швидкості течії рідини в радіальному напрямку, що відповідає закону ламінарного руху Пуазейля [22], другий член – відтворює вплив електрокінетичного явища потенціалу протікання на швидкість w_x рідини з властивостями електроліту.

3. З урахуванням, як зазначалося, сталих значень E_x , G_x потенціал протікання дорівнює:

$$\Delta\varphi = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Psi_s}{\mu \cdot \gamma} \cdot K \cdot \Delta p. \quad (6)$$

Тобто, формула Гельмгольца-Смолуховського [19] доповнена корекційним фактором K [20], який відтворює вплив співвідношення між радіусом капіляра та товщиною подвійного електричного шару в рідині на величину потенціалу протікання в поєднанні з урахуванням електрокінетичних і фізичних властивостей досліджуваної рідини. Корекційний фактор K змінюється в межах від 0 до 1 і прямує до 1 за умови, що відношення R/δ прямує до нескінченності.

Формула для обчислення корекційного фактора K , що наведена в роботі автора [20], дозволяє визначити граничні значення радіуса капіляра, які гарантовано унеможливають зменшення величини потенціалу протікання через поверхневу провідність, а тому може слугувати основою для вибору цього важливого геометричного розміру ПП.

4. Значення діелектричної проникності, в'язкості, електропровідності, потенціалу Ψ_s (або ζ -потенціалу за Смолуховським), корекційного коефіцієнта K , що входять до правої частини формули (6), залежать як від концентрації компонентів у контрольованій технологічній рідині, так і від її температури. За незмінних кількісного складу і температури рідини її потенціал протікання на одному й тому ж первинному перетворювачі пропорційний перепаду тиску на останньому:

$$\Delta\varphi = a \cdot \Delta p, \quad (7)$$

бо за цих умов

$$a = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Psi_s}{\mu \cdot \gamma} \cdot K = const. \quad (8)$$

Кожне окреме значення коефіцієнта a_i , визначене в досліді за довільної, але незмінної в цих досліді температури рідини, на одному і тому ж первинному перетворювачі потенціалу протікання згідно з рівнянням прямої (7) як

$$a_i = \left. \frac{\partial\Delta\varphi}{\partial\Delta p} \right|_{t=const} = tg\alpha_i = f(x), \quad (9)$$

де α_i – кут нахилу прямої (7), ідентифікує конкретний вміст контрольованого компонента x_i в технологічній рідині.

Слід зауважити, що аналітичним шляхом обчислити значення коефіцієнта a рівняння (8) на основі сучасної теорії електрокінетичного явища потенціалу протікання і за використаною математичною моделлю явища неможливо з причин:

1) невизначеності величин ε , γ , μ у подвійному електричному шарі через високу напруженість електричного поля у ньому;

2) відсутності методів розрахунку та методів експериментального вимірювання

значень потенціалу на твердій поверхні ψ_s або ζ -потенціалу на площині ковзання в дифузному шарі контрольованої технологічної рідини.

Окрім цього, розглянута математична модель явища потенціалу протікання не дає відповіді на питання визначення граничної довжини капіляра як ПП, а тому в цьому сенсі її слід визнати недосконалою.

Виконаний аналіз фізичної і математичної моделі явища потенціалу протікання дає підстави визначити основні вимоги до ПП:

– гідродинамічні й електрокінетичні характеристики ПП повинні відрізнятися стабільністю та відтворюваністю згенерованого потенціалу протікання протягом тривалого періоду вимірювань;

– геометричні характеристики ПП мають бути в межах, що не обумовлюють зменшення електрокінетичного потенціалу внаслідок поверхневої провідності, стиснення дифузного шару та істотної зміни діелектричної проникності, електропровідності і в'язкості досліджуваної технологічної рідини у подвійному електричному шарі;

– перепад тиску на ПП, що залежить від його геометричних характеристик, має забезпечувати наявність ламінарного режиму руху течії досліджуваної технологічної рідини та генерування максимального значення потенціалу протікання;

– матеріал перетворювача має бути хімічно стійким відносно досліджуваних технологічних рідин і забезпечувати в контакті з цими рідинами високі значення електрокінетичного потенціалу;

– конструкція перетворювача повинна дозволяти його легке періодичне промивання від механічних домішок для відновлення гідродинамічних та електрокінетичних характеристик.

Експериментальні дослідження були проведені з метою визначення основних геометричних параметрів ПП – прямого капіляра, що забезпечують отримання усталеного значення потенціалу протікання і достовірність результатів експериментів.

Досліди виконувалися на дистильованій воді, яка серед неорганічних та органічних полярних рідин здатна утворювати істотний за товщиною подвійний електричний шар ($\sim 1 \cdot 10^{-6}$ м за температури 20°C).

Суть методики експериментальних досліджень полягає в наступному. Потенціал протікання формувався в процесі руху досліджуваної рідини через ПП. Різницю потенціалів течії вимірювали платиновими електродами та мультиметром моделі UT70A з максимальною відносною похибкою вимірювання $\pm 0,5\%$ і великим вхідним опором. Це зумовлено тим, що електричний струм схеми вимірювання I_g не повинен порушувати стаціонарної рівноваги

$$I_{em} = I_k + I_g, \quad (10)$$

де I_{em} , I_k – відповідно електроміграційний і конвективний струми в ПП. Тобто необхідною умовою є $I_k \gg I_g$ та $I_{em} \approx I_k$.

Як ПП використовували скляні капіляри різної довжини з діаметрами каналів 0,34; 0,50 та 0,73 мм. Діаметри капілярів гарантовано перевищують товщину подвійного електричного шару для дистильованої води, наведену вище, що фактично унеможливує зменшення величини потенціалу протікання через поверхневу провідність, оскільки корекційний фактор K має значення, близькі до одиниці.

Матеріал електродів – дріт платиновий марки Пл99,9-М, що використовується для серійного виготовлення електродів. Такі електроди застосовуються для вимірювання окислювально-відновлювальних потенціалів у водних розчинах, пульпах у межах зміни температури від 0 до 150°C .

Вимірна камера з досліджуваним капіляром, з'єднувальні провідники від електродів до мультиметра та сам мультиметр були екрановані, а екрани – заземлені.

Течія досліджуваної рідини та відповідно перепад тиску на ПП створювалися за допомогою посудини Маріотта. Перепад тиску течії на ПП визначали за допомогою двох п'єзометричних трубок і мірної лінійки з ціною поділки 1 мм. Витрату досліджуваної рідини вимірювали об'ємним і масовим методами за допомогою стандартних мірних мензурок, ваги аналітичної

ВПТ-1 та секундоміра моделі С-1-2а “Агат”. Температуру рідини вимірювали з максимальною похибкою $\pm 0,5$ °С платино-родієвою термопарою з вторинним приладом моделі М890G та стандартними ртутними термометрами. Усталеність температури течії забезпечувалась ультратермостатом моделі УТУ-3.

Стабільність режиму течії досліджуваної рідини при конкретній її витраті оцінювалася візуально за незмінністю перепаду рівнів рідини в п'єзометричних трубках і температури рідини. При досягненні зазначених умов фіксували покази мультиметра, рівні рідини в п'єзометричних трубках, температуру рідини та її витрату. У кожному досліді фіксували і враховували при обробленні результатів початкову різницю потенціалів між електродами, зумовлену електродними процесами в нерухомій рідині. У процесі оброблення результатів дослідів використовували середньоарифметичні значення зафіксованих показників.

У межах окремої серії дослідів витрата досліджуваної рідини за її сталої температури збільшувалася (зменшувалася) східчасто, але неперервно протягом цієї серії. З метою досягнення відтворюваності дослідів ідентичні серії повторювалися від двох до п'яти раз. За мінімальну обиралася витрата рідини, що дозволила достовірно виміряти як різницю потенціалів, так і перепад тиску течії на первинному перетворювачі.

Усі використані в дослідженнях потенціалу протікання рідин серійні контрольно-вимірювальні прилади атестовані в ДП “Івано-Франківськстандартметрологія”.

Під час експериментальних досліджень явища потенціалу протікання потрібно витримувати ряд умов гідродинамічного характеру, що забезпечують виникнення стаціонарної ламінарної течії досліджуваної рідини в ПП. Для капіляра такі гідродинамічні умови можуть характеризуватися мінімальним співвідношенням його довжини l до діаметра d , за якого буде мати місце стабільна параболічна епюра швидкості рідини в осьовому перерізі капіляра – епюра Пуазейля. Такі ж умови існують для ПП – пористих перего-

родок: при зменшенні відношення довжини капілярів до їх поперечного перерізу перегородка стає подібною до звичайного решета чи сита і неможливість утворення потенціалу протікання на такій перегородці під дією накладеного ззовні перепаду тиску за цих умов стає очевидною.

Варто ще раз зауважити, що науково обґрунтоване визначення довжини капіляра має важливе практичне значення для розроблення вимірної комірки ПП.

В основу проведених дослідів було покладено пошук мінімального або граничного співвідношення l/d , необхідного для формування усталеного та відтворюваного значення потенціалу протікання [18, 19]. За менших значень l/d неможливо отримати усталене значення потенціалу протікання під дією створеного ззовні перепаду тиску, бо кількість надлишкових іонів одного знаку, винесених з об'єму дифузного шару в капілярі в напрямі руху течії, недостатня для забезпечення, як вже зазначалося, потрібного співвідношення між конвективним і вимірювальним струмами: $I_k \gg I_g$.

За умови ізотермічності течії рідини ламінарний режим у круглих капілярах зберігається за значень критерію Рейнольдса Re до 2300 [102, 104]. Вся течія в капілярі може розглядатися умовно складеною з двох дільниць: вхідної або дільниці стабілізації гідродинамічної та дільниці течії Пуазейля.

У вхідній дільниці рідина, що поступає до капіляра, піддається гальмівній дії його стінок і утворює на них пристінний ламінарний шар, товщина якого поступово зростає зі збільшенням відстані від вхідного перерізу капіляра. Коли товщина пристінного шару стає рівною радіусу капіляра, весь об'єм капіляра стає заповненим ламінарною течією рідини, в якій діють сили в'язкого тертя. Під дією гальмівних сил вхідна рівномірна за поперечним перерізом капіляра епюра швидкості течії поступово набуває параболічного профілю, характерного для течії Пуазейля.

Для прямого капіляра довжина вхідної дільниці стабілізації гідродинамічної l_{ce} визначається співвідношенням [22]:

$$l_{cz} \cong 0,005 \cdot d \cdot Re, \quad (11)$$

де $Re = w \cdot d / \nu$ – критерій Рейнольдса;

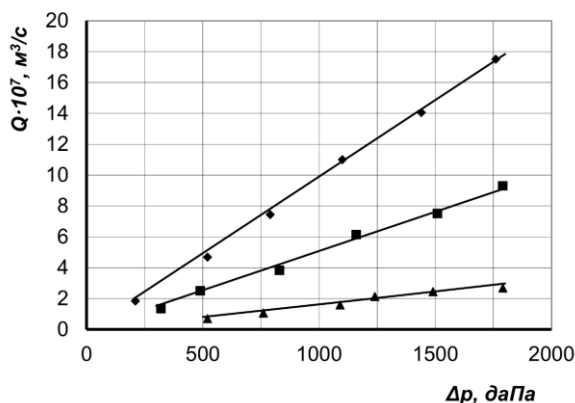
w – середня в поперечному перерізі капіляра швидкість течії, м/с;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, м²/с. Зі збільшенням критерію Рейнольдса довжина зазначеної ділянки зростає.

Спочатку дослідним шляхом була отримана залежність об'ємної витрати дистильованої води Q , м³/с від перепаду тиску Δp на капілярах достатньої для утворення ламінарної течії довжини. У межах зміни Δp від 200 до 1800 Па з урахуванням похибки експерименту ця залежність адекватно апроксимується законом Пуазейля [22] (рис. 2):

$$Q = \frac{\pi}{8 \cdot \mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^4, \quad (12)$$

що засвідчило наявність ламінарного режиму руху течії рідини в досліджуваних капілярах.



◆ – $d = 0,73$ мм, $l = 70$ мм; ■ – $d = 0,50$ мм, $l = 30$ мм; ▲ – $d = 0,34$ мм, $l = 20$ мм

Рисунок 2 – Витрата дистильованої води Q через капіляри різних діаметрів залежно від створеного зовні перепаду тиску Δp за температури 20 °С (суцільні лінії – за рівнянням (12))

За формулою (6) величина потенціалу протікання пропорційна перепаду тиску на ПП у першій степені в межах ламінарного режиму руху течії рідини, тобто до досягнення критичного значення критерію Рейнольдса для цих капілярів, за якого руйнується подвійний електричний шар. Оскільки

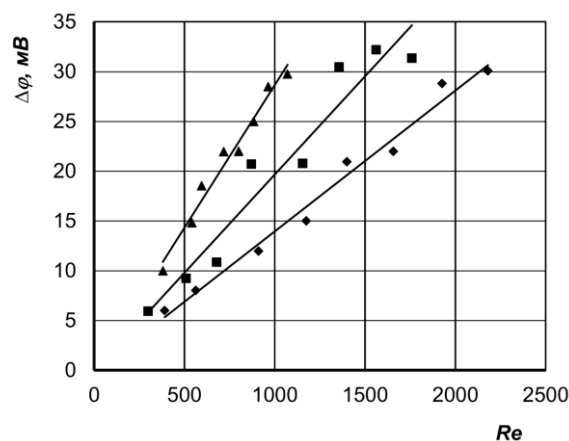
$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \quad (13)$$

а коефіцієнт опору тертя для ламінарної течії дорівнює

$$\lambda = 64/Re, \quad (14)$$

то перепад тиску на капілярі змінюється пропорційно середній у поперечному перерізі капіляра швидкості течії в першій степені.

За умови ізотермічності течії така ж пропорційність між потенціалом протікання дистильованої води і критерієм Рейнольдса має місце для досліджених капілярів (рис. 3). При цьому критичні значення критерію Рейнольдса в межах зазначених вище перепадів тисків у проведених дослідях із дистильованою водою не були досягнуті на жодному з капілярів, що забезпечували відтворювані значення потенціалу протікання, хоча в окремих дослідях критерій Рейнольдса сягав значень 3500-3600. Це узгоджується з результатами дослідів японських учених [23], які встановили, що для турбулентних течій рідини збереження зазначеної лінійної залежності зумовлене перевищенням товщини пристінного в'язкого підпрошарку над товщиною подвійного електричного шару. За таких умов подвійний електричний шар не руйнується.



▲ – $d = 0,34$ мм, $l = 20$ мм, $\rho = 0,987$;
■ – $d = 0,50$ мм, $l = 30$ мм, $\rho = 0,967$;
◆ – $d = 0,73$ мм, $l = 70$ мм, $\rho = 0,991$

Рисунок 3 – Вплив діаметра капіляра на потенціал протікання $\Delta \phi$ дистильованої води при різних значеннях критерію Рейнольдса Re за температури 20 °С

За однакових умов зменшення діаметра капіляра збільшує значення потенціалу протікання (рис. 3), що пояснюється зростанням фактичної електропровідності рідини як суми питомої електропровідності вільного об'єму рідини та величини поверхневої провідності. При цьому відношення площ поперечного перерізу подвійного електричного шару до загальної площі капіляра збільшується, тому зростає і частка поверхневої провідності у фактичній електропровідності рідини.

Під час експериментального визначення потенціалу протікання, як вже зазначалося, отримання відтворюваних результатів супроводжується певними труднощами [18, 19]. Тому відтворюваними вважалися досліди, в яких коефіцієнт кореляції ρ залежності потенціалу протікання від критерію Рейнольдса перевищував значення 0,95. Коефіцієнт кореляції ρ обчислювався за класичною формулою для лінійних регресій [24]:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(n-1) \cdot S_x \cdot S_y}, \quad (15)$$

де \bar{x} , \bar{y} – середні значення x_i та y_i ;

n – об'єм вибірки;

S_x , S_y – дисперсії, що визначалися за формулами:

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (16)$$

$$S_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (17)$$

Результати експериментів із капілярами різних довжин засвідчили, що в межах зміни критерію Рейнольдса від мінімального значення ~ 200 до значень більше 1000 потенціал протікання достовірно не ідентифікувався на капілярах довжиною меншою за l_{ce} . Останню визначали за формулою (11) за більших значень критерію Рейнольдса, наведених у табл. 1, з метою забезпечення умов для генерації максимальних величин потенціалу протікання.

Згідно з дослідами з дистильованою водою найменші значення потенціалу протікання порядку (3-5) мВ, що ідентифікувалися застосованою виміральною системою, генерувалися за значень критерію Рейнольдса в межах від 200 до 400 незалежно від діаметра капіляра, але за достатньої його довжини (рис. 3). Відповідно до теорії подібності фізичних явищ цей факт дає підстави стверджувати, що мінімальні відтворювані значення потенціалу протікання досліджуваної рідини в капілярах генеруються гідродинамічно подібними течіями. Тобто, не за однакових витрат рідини, перепадів тиску на капілярах чи середніх швидкостей течії, а за однакових значень критерію Рейнольдса в капілярах достатньої довжини, про які йтиметься нижче.

За довжини капілярів, рівної l_{ce} , експериментальні значення потенціалу протікання були на межі відтворюваності (табл. 1). Результати дослідів із капілярами довжиною від $(1,2-1,5)l_{ce}$ і до $(2-3)l_{ce}$ були інформативними як за значеннями потенціалу протікання, так і за коефіцієнтом кореляції.

Отже, довжина дільниці прямого капіляра, що необхідна для досягнення усталеного значення потенціалу протікання, згідно з нашими дослідами з дистильованою водою більша за l_{ce} . Вищенаведене дає підстави припустити існування в капілярі достатньої довжини трьох дільниць: стабілізації гідродинамічної, стабілізації електрокінетичної та дільниці усталеного режиму значень потенціалу протікання. Ця гіпотеза базується на аналогії з тепловіддачею за ламінарного режиму руху течії рідини в циліндричних каналах, для котрої довжина дільниці теплової стабілізації тепловіддачі l_{cm} більша за l_{ce} і складає [22]

$$l_{cm} \approx 0,05 \cdot d \cdot Re \cdot Pr, \quad (18)$$

де Pr – критерій Прандтля рідини (для рідин $Pr > 1$), але вона має бути засвідчена чи спростована відповідними теоретичними й експериментальними дослідженнями.

Таблиця 1 – Вплив довжини капілярів на формування усталеного значення потенціалу протікання дистильованої води

Діаметр капіляра d, мм	Довжина капіляра l, мм	Межі зміни критерію Рейнольдса Re	Довжина дільниці l _{ст} , мм	Коефіцієнт кореляції ρ залежності Δφ від Re	Відтворюваність залежності Δφ від Re
0,34	10	200-1100	18,7	–	не відтворюється
0,34	15	230-1090	18,5	0,954	на межі відтворюваності
0,34	20	380-1070	18,2	0,987	відтворюється
0,34	25	380-900	15,3	0,989	відтворюється
0,50	10	210-1030	25,7	–	не відтворюється
0,50	15	190-1080	27,0	–	відсутня кореляція між Δφ та Re
0,50	20	200-1050	26,3	0,943	на межі відтворюваності
0,50	25	300-2060	51,5	–	не відтворюється
0,50	30	300-1760	44,0	0,967	на межі відтворюваності
0,50	40	350-1020	25,5	0,985	відтворюється
0,73	20	300-1050	38,3	–	не відтворюється
0,73	25	360-1090	34,8	–	відсутня кореляція між Δφ та Re
0,73	30	350-1030	36,05	0,959	на межі відтворюваності
0,73	50	370-1800	65,7	0,968	на межі відтворюваності
0,73	70	390-2180	76,3	0,991	відтворюється

Висновки

1. Науково обґрунтовано критерії вибору основних характеристик ПП на основі прямих капілярів, які забезпечують формування ламінарного режиму течії досліджуваної рідини, досягнення максимальних відтворюваних значень потенціалу протікання за одночасної мінімізації перепаду тиску на ПП, простоти і надійності його конструкції.

2. Встановлено, що відтворювані значення потенціалу протікання формуються за умови, коли довжина капіляра перевищує довжину ділянки гідродинамічної стабілізації ламінарної течії не менш ніж у 1,2–1,5 рази, що забезпечує досягнення усталеного режиму генерації потенціалу протікання.

3. Доведено, що радіус капіляра має перевищувати товщину подвійного електричного шару і може сягати до 1 мм, що спрощує періодичне промивання його внутрішньої порожнини від механічних відкладень для відновлення гідродинамічних та електрокінетичних характеристик.

4. Експериментально підтверджено, що відтворювані значення потенціалу протікання в прямих капілярах різних геометричних розмірів визначаються умовами гідродинамічної подібності течій, зокрема однаковими значеннями критерію Рейнольдса, а не абсолютними значеннями витрати рідини чи перепаду тиску на ПП.

5. На основі аналізу експериментальних даних та аналогії з тепловіддачею за ламінарного режиму руху течії рідини в циліндричних каналах висунуто гіпотезу про існування в капілярі трьох характерних ділянок течії: гідродинамічної стабілізації, електрокінетичної стабілізації і усталеного режиму генерації потенціалу протікання, що потребує подальшого теоретичного та експериментального підтвердження.

6. Показано, що сучасна математична модель явища потенціалу протікання, аналіз якої розглянуто в роботі, не дозволяє аналітичним шляхом обчислити значення потенціалу протікання, місце розташування площини ковзання в подвійному електричному шарі та величину електрокінети-

чного потенціалу на ній, граничну довжину капіляра, врахувати вплив шорсткості поверхні каналу й ін., а тому підлягає подальшому перегляду та вдосконаленню.

7. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості науково обґрунтованого вибору геометричних та гідродинамічних параметрів зазначених капілярних ПП при проектуванні та оптимізації інформаційно-вимірвальних сис-

тем експрес-контролю якості технологічних рідин на основі методу потенціалу протікання.

Подяки
Відсутні.

Конфлікт інтересів
Відсутній.

Список використаних джерел

1. Mitchell R. F., Miska S. Z. *Fundamentals of drilling engineering*. Richardson, TX : Society of Petroleum Engineers, 2011. 696 p. ISBN 9781555632076.
2. Бойко В. С. *Розробка та експлуатація нафтових родовищ : підручник*. 4-те вид. Київ : Міжнародна економічна фундація, 2008. 484 с. ISBN 978-966-96506-6-5.
3. Кондрат Р. М., Кондрат О. Р., Матіішин Л. І. *Розробка та експлуатація газових і газоконденсатних родовищ : підручник*. Івано-Франківськ : Фоліант, 2023. 568 с. ISBN 978-966-694-428-6.
4. *Довідник з нафтогазової справи / ред.: В. С. Бойко, Р. М. Кондрат, Р. С. Яремійчук*. Львів, 1996. 620 с. ISBN 5-335-01293-5.
5. *Standard handbook of petroleum and natural gas engineering / eds.: W. C. Lyons, G. J. Plisga, M. D. Lorenz*. 3rd ed. Oxford : Gulf Professional Publishing, 2016. 1822 p. ISBN 9780123838469.
6. *Standard methods for the examination of water and wastewater / eds.: W. C. Lipps, E. B. Braun-Howland, T. E. Baxter*. 24th ed. Washington, DC : American Public Health Association ; American Water Works Association ; Water Environment Federation, 2023. 1516 p. ISBN 9780875532998.
7. Дорожовець М. М., Івах Р. М., Мотало В. П. *Метрологія та вимірювання : навчальний посібник / ред. Б. І. Стадник*. Львів : Національний університет "Львівська політехніка", 2012. 312 с. ISBN 978-617-607-276-8.
8. *Instrument and automation engineers' handbook : Volume I: Measurement and safety / eds.: V. G. Lipták, K. Venczel*. 5th ed. Boca Raton : CRC Press, 2017. 2226 p. ISBN 978-1498727648.
9. Fraden J. *Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications*. 5th ed. Cham: Springer International Publishing, 2016. 758 p. ISBN 978-3319307671.
10. Jin Y., Zheng X., Chi Y. et al. Experimental study and assessment of different measurement methods of water in oil sludge. *Drying Technology*. 2014. Vol. 32, iss. 3. P. 251–257. URL: <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.811251>
11. ASTM D4944-25. Standard test method for field determination of water (moisture) content of soil by the calcium carbide gas pressure tester. Effective from 15.01.2025. West Conshohocken : ASTM International, 2025. 6 p. URL: <https://doi.org/10.1520/D4944-25>
12. Dietzel M., Hardt S. Flow and streaming potential of an electrolyte in a channel with an axial temperature gradient. *Journal of Fluid Mechanics*. 2017. Vol. 813. P. 1060–1111. URL: <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.844>
13. Fan B., Bandaru P. R. Possibility of obtaining two orders of magnitude larger electrokinetic streaming potentials, through liquid infiltrated surfaces. *Langmuir*. 2020. Vol. 36, iss. 34. P. 10238–10243. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01771>
14. Zhang X., Zhao M., Wang K. Experimental study on the streaming potential phenomenon response to compactness and salinity in soil–rock mixture. *Water*. 2021. Vol. 13, iss. 15. Art. 2071. P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.3390/w13152071>

15. Soldi M., Jougnot D., Guarracino L. An analytical effective excess charge density model to predict the streaming potential generated by unsaturated flow. *Geophysical Journal International*. 2019. Vol. 216, iss. 1. P. 380–394. URL: <https://doi.org/10.1093/gji/ggy391>
16. Huang S., Rahmani A. M., Singletary T., Colosqui C. E. Molecular dynamics and continuum analyses of the electrokinetic zeta potential in nanostructured slit channels. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2020. Vol. 603. Art. 125100. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125100>
17. Fiorentino E.-A., Toussaint R., Jouniaux L. Two-phase Lattice Boltzmann modelling of streaming potentials: influence of the air–water interface on the electrokinetic coupling. *Geophysical Journal International*. 2017. Vol. 208, iss. 2. P. 1139–1156. URL: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw417>
18. Козак О. Ф. Визначення основних геометричних параметрів капілярної системи для дослідного формування усталеного значення потенціалу протікання. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2008. № 1 (17). С. 109–115. URL: <https://nv.nung.edu.ua/index.php/nv/article/view/101>
19. Newman J. S., Thomas-Alyea K. E. *Electrochemical systems*. 3rd ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2004. 672 p. ISBN 978-0471477563.
20. Козак О. Ф. Визначення якості розчину диетиленгліколю за методом потенціалу протікання. *Методи та прилади контролю якості*. 2010. № 1 (24). С. 40–45. URL: <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/97>
21. Козак О. Ф. Теоретичні основи ефекту електрокінетичного гальмування фільтрації вуглеводнів через породи-колектори. *Методи та прилади контролю якості*. 2012. № 2 (29). С. 56–61. URL: <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/55>
22. Schlichting H., Gersten K. *Boundary-layer theory*. 9th ed. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2017. 805 p. ISBN 978-3-662-52917-1.
23. Watanabe T., Katagishi Y. Deviation of linear relation between streaming potential and pore fluid pressure difference in granular material at relatively high Reynolds numbers. *Earth Planets Space*. 2006. Vol. 58, No. 8. P. 1045–1051. URL: <https://doi.org/10.1186/BF03352609>
24. Arkes J. *Regression analysis: a practical introduction*. 3rd ed. London ; New York : Routledge, 2025. 524 p. ISBN 978-1041002598.

References

1. Mitchell, R. F., & Miska, S. Z. (2011). *Fundamentals of drilling engineering*. Society of Petroleum Engineers.
2. Boiko, V. S. (2008). *Rozrobka ta ekspluatatsiia naftovykh rodovyshch: pidruchnyk* [Development and operation of oil fields: Textbook] (4th ed.). Mizhnarodna Ekonomichna Fundatsiia. (in Ukrainian)
3. Kondrat, R. M., Kondrat, O. R., & Matiishyn, L. I. (2023). *Rozrobka ta ekspluatatsiia hazovykh i hazokondensatnykh rodovyshch: pidruchnyk* [Development and operation of gas and gas condensate fields: Textbook]. Foliant. (in Ukrainian)
4. Boiko, V. S., Kondrat, R. M., & Yaremiichuk, R. S. (Eds.). (1996). *Dovidnyk z naftohazovoi spravy* [Handbook of oil and gas engineering]. Lviv. (in Ukrainian)
5. Lyons, W. C., Plisga, G. J., & Lorenz, M. D. (Eds.). (2016). *Standard handbook of petroleum and natural gas engineering* (3rd ed.). Gulf Professional Publishing.
6. Lipps, W. C., Braun-Howland, E. B., & Baxter, T. E. (Eds.). (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation.
7. Dorozhovets, M. M., Ivakh, R. M., & Motalo, V. P. (2012). *Metrolohiia ta vymiriuvannia: navchalnyi posibnyk* [Metrology and measurements: Educational manual] (B. I. Stadnyk, Ed.). Lviv Polytechnic National University. (in Ukrainian)

8. Lipták, B. G., & Venczel, K. (Eds.). (2017). *Instrument and automation engineers' handbook: Volume I: Measurement and safety* (5th ed.). CRC Press.
9. Fraden, J. (2016). *Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications* (5th ed.). Springer International Publishing.
10. Jin, Y., Zheng, X., & Chi, Y. (2014). Experimental study and assessment of different measurement methods of water in oil sludge. *Drying Technology*, 32(3), 251–257. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.811251>
11. ASTM International. (2025). *ASTM D4944-25. Standard test method for field determination of water (moisture) content of soil by the calcium carbide gas pressure tester*. <https://doi.org/10.1520/D4944-25>
12. Dietzel, M., & Hardt, S. (2017). Flow and streaming potential of an electrolyte in a channel with an axial temperature gradient. *Journal of Fluid Mechanics*, 813, 1060–1111. <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.844>
13. Fan, B., & Bandaru, P. R. (2020). Possibility of obtaining two orders of magnitude larger electrokinetic streaming potentials, through liquid infiltrated surfaces. *Langmuir*, 36(34), 10238–10243. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01771>
14. Zhang, X., Zhao, M., & Wang, K. (2021). Experimental study on the streaming potential phenomenon response to compactness and salinity in soil–rock mixture. *Water*, 13(15), Article 2071. 1–20. <https://doi.org/10.3390/w13152071>
15. Soldi, M., Jougnot, D., & Guarracino, L. (2019). An analytical effective excess charge density model to predict the streaming potential generated by unsaturated flow. *Geophysical Journal International*, 216(1), 380–394. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy391>
16. Huang, S., Rahmani, A. M., Singletary, T., & Colosqui, C. E. (2020). Molecular dynamics and continuum analyses of the electrokinetic zeta potential in nanostructured slit channels. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 603, Article 125100. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125100>
17. Fiorentino, E.-A., Toussaint, R., & Jouniaux, L. (2017). Two-phase Lattice Boltzmann modelling of streaming potentials: influence of the air–water interface on the electrokinetic coupling. *Geophysical Journal International*, 208(2), 1139–1156. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw417>
18. Kozak, O. F. (2008). Vyznachennia osnovnykh heometrychnykh parametriv kapiliarnoi systemy dlia doslidnoho formuvannya ustalenooho znachennia potentsialu protikannya [Determination of the main geometric parameters of the capillary system for experimental formation of a steady value of the streaming potential]. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, (1), 109–115. <https://nv.nung.edu.ua/index.php/nv/article/view/101> (in Ukrainian)
19. Newman, J. S., & Thomas-Alyea, K. E. (2004). *Electrochemical systems* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
20. Kozak, O. F. (2010). Vyznachennia yakosti rozchynu dyetylenhliokoliu za metodom potentsialu protikannya [Determination of diethylene glycol solution quality by the streaming potential method]. *Methods and Instruments of Quality Control*, (1), 40–45. <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/97> (in Ukrainian)
21. Kozak, O. F. (2012). Teoretychni osnovy efektu elektrokynetychnoho halmuvannia filtratsii vuhlevodniv cherez porody-kolektory [Theoretical foundations of the electrokinetic braking effect of hydrocarbon filtration through reservoir rocks]. *Methods and Instruments of Quality Control*, (2), 56–61. <https://mpky.nung.edu.ua/index.php/mpky/article/view/55> (in Ukrainian)
22. Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). *Boundary-layer theory* (9th ed.). Springer.

23. Watanabe, T., & Katagishi, Y. (2006). Deviation of linear relation between streaming potential and pore fluid pressure difference in granular material at relatively high Reynolds numbers. *Earth Planets Space*, 58(8), 1045–1051. <https://doi.org/10.1186/BF03352609>
24. Arkes, J. (2025). *Regression analysis: A practical introduction* (3rd ed.). Routledge.

SCIENTIFIC PRINCIPLES OF GENERATING REPRODUCIBLE VALUES OF STREAMING POTENTIAL OF TECHNOLOGICAL FLUIDS USING CAPILLARY PRIMARY TRANSDUCERS

O. F. Kozak

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
76019, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, Ukraine,
<https://orcid.org/0009-0008-5663-4295>
e-mail: oleksii.kozak@nung.edu.ua

Abstract. The paper develops and experimentally substantiates the scientific foundations for generating reproducible streaming potential values of technological liquids using capillary primary transducers for rapid quality control in the oil and gas industry and related fields. The relevance of the study is due to the limitations of conventional methods for determining liquid quality indicators, in particular water content, in terms of response time, cost, and suitability for automation. The aim of the work is to establish quantitatively justified criteria for selecting the geometric parameters of a straight capillary based on the analysis and generalization of physical and mathematical models of the streaming potential phenomenon. The conditions for obtaining reproducible streaming potential values are systematically related to hydrodynamic similarity parameters, in particular the Reynolds number, and to capillary geometry. It is established that reproducible values are achieved under conditions of hydrodynamic similarity and when the capillary length exceeds the hydrodynamic entrance length by at least 1.2–1.5 times. The use of capillaries with a radius exceeding the electric double layer thickness is substantiated as a means to reduce the influence of surface conductivity and ensure measurement stability. A hypothesis on the existence of three characteristic flow regions in a capillary – hydrodynamic stabilization, electrokinetic stabilization, and steady-state streaming potential generation – is proposed. The obtained results provide a scientific basis for improving information-measuring systems for rapid quality control of technological liquids based on the streaming potential method through optimization of geometric and hydrodynamic parameters of capillary primary transducers, ensuring improved reproducibility, accuracy, and reliability of measurements.

Keywords: electrokinetic phenomena; electric double layer; rapid quality control; laminar flow; hydrodynamic similarity.