

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 681.2: 532.64

### ЕКСПРЕС-МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КРАЙОВОГО КУТА ЗМОЧУВАННЯ ПОРИСТИХ ТІЛ

*Р. Т. Боднар*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, (0342) 72-71-68, [zarichna@nung.edu.ua](mailto:zarichna@nung.edu.ua)*

*Проаналізовані відомі методи вимірювання крайового кута змочування пористих твердих тіл. Вказані їх переваги і недоліки та рекомендації щодо їх застосування. Запропоновано вдосконалений метод капілярного підняття з метою оперативного вимірювання крайового кута змочування пористих тіл. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано використовувати цифрову обробку зображення змоченого пористого тіла, отриманого за допомогою цифрового мікроскопа.*

*Ключові слова: крайовий кут змочування, пористі тверді тіла, поверхнево-активні речовини.*

*Проанализированы известные методы измерения краевого угла смачивания пористых твердых тел. Указанные их преимущества, недостатки и рекомендации по их применению. Предложен усовершенствованный метод капиллярного поднятия с целью оперативного измерения краевого угла смачивания пористых твердых тел. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложено использовать цифровую обработку изображения смачиваемого пористого твердого тела, полученного с помощью цифрового микроскопа.*

*Ключевые слова: краевой угол смачивания, пористые твердые тела, поверхностно-активные вещества.*

*The known methods for measuring the contact angle of porous solids. Given their advantages, disadvantages and recommendations for their use. An improved method of capillary rise for the purpose of on-line measurement of the contact angle of porous solids. On the basis of theoretical and experimental studies suggested to use digital image processing wettable porous solid body produced by a digital microscope.*

*Keywords: contact angle, porous solids, surfactants.*

**Вступ.** Процеси, що протікають на межі поділу фаз, в багатьох випадках визначають найважливіші технологічні й природні процеси у всіх галузях народного господарства, побуті, медицині. Фундаментальною властивістю межі поділу фаз є поверхневий натяг, який визначає питому вільну поверхневу енергію рідини на межі контакту тверде тіло – рідина – навколишній газ та зумовлює широке коло капілярних явищ, а саме, кавітацію, змочування твердих поверхонь рідинами, просочення пористих тіл тощо. Явище змочування твердих тіл рідинами характеризує молекулярну взаємодію між

ними і суттєво впливає на багато технологічних процесів, зокрема в нафтовидобувній, гірничо-рудній, хімічній, харчовій, медичній, типографській, машинобудівній, транспортуванні рідин трубопроводами, неруйнуючому контролі проникаючими речовинами та ще в багатьох інших випадках.

**Постановка проблеми.** Для підвищення нафтовидобутку необхідно гідрофілізувати тверду породу, а для обмеження притоку пластових вод в нафтові свердловини слід гідрофобізувати породу. Гідрофілізацію і гідрофобізацію змочуваної породи можна здійснювати за допомогою

поверхнево-активних речовин (ПАР) [1]. При цьому сумарний ефект дії ПАР на змочування залежить від природи твердої поверхні і властивостей ПАР. Це визначає попереднє вивчення впливу ПАР на змочування залежно від характеристик нафтоносних порід, які є пористими матеріалами. Змочування пористих нафтогазоносних порід є одним із показників, що визначають процес витіснення нафти з нафтогазоносних пластів. Це зумовлює необхідність оцінювання змочування пористих тіл, яке можливе шляхом вимірювання параметрів, які характеризують процес змочування. Змочуваність твердої поверхні рідиною оцінює такий параметр як крайовий кут змочування (ККЗ). При змочуванні пористих тіл слід враховувати, що ККЗ, як кількісна характеристика в цих умовах суттєво відрізняється від ККЗ гладких поверхонь.

Для підвищення продуктивності нафтовидобутку змінюють рецептуру розчинів ПАР, але оцінку їхньої взаємодії в системі пластовий флюїд-гірська порода-водний розчин ПАР і її динаміку здійснюють досить приблизно. Тому проблема вимірювання ККЗ в нафтовидобувній галузі є актуальною.

**Аналіз останніх публікацій.** У даній час крайові кути змочування визначають різними методами залежно від фізико-хімічних властивостей рідин і твердих тіл, а також в залежності від наявності технічних засобів, які є в розпорядженні дослідника [1, 2, 3]. Широко розповсюджений метод дослідження форми краплі рідини на поверхні досліджуваного тіла (Drop Shape Analysis – DSA), причому є можливість досліджувати як профіль лежачої краплі, так і форму бульбашки газоподібної фази (повітря) під пластиною. Наприклад, у відомій німецькій компанії KRÜSS GmbH [4, 5], що займається дослідженням та виробництвом високоякісної продукції у сфері поверхневої та міжфазної хімії, виготовляються прилади тільки для вимірювання ККЗ плоских монолітних твердих тіл, але їх не можна використовувати для контролю змочуваності пористих тіл в зв'язку із всмоктуванням рідин в пори досліджуваних зразків та нерівності поверхні.

Існує декілька варіантів для визначення змочуваності пористих тіл [1, 6]. Відомий спосіб визначення змочуваності пористих тіл шляхом їх насичення спочатку еталонною рідиною, а потім досліджуваною. Швидкість підняття рідини

визначають за попереднього вимірювання висоти підняття рідини або за зміною маси зразка. Значення ККЗ розраховують за допомогою такої формули:

$$\cos \theta' = \frac{V\mu\sigma'}{V\mu\sigma} \cos \theta, \quad (1)$$

де  $\theta, \theta'$  – відповідно крайові кути змочування пористого тіла еталонною (відомою) та досліджуваною рідиною;  $V, V'$  – відповідно швидкість капілярного підняття рідини у пористому тілі;  $\mu, \mu'$  – відповідно динамічна в'язкість еталонної і досліджуваної рідин;  $\sigma, \sigma'$  – відповідно поверхневий натяг еталонної та досліджуваної рідин.

Метод має суттєвий недолік – це складність визначення ККЗ для еталонної рідини. Існують різні модифікації цього методу, але вони або суттєво ускладнюють метод, або не дозволяють досягти необхідної точності.

Можна також відмітити методи, які базуються на штучній гідрофілізації зразка із використанням як еталонної рідини води. При цьому гідрофілізація зразків здійснюється за допомогою його екстракції або прожарювання. Однак при цьому також виникає проблема визначення ККЗ еталонною рідиною пористого тіла.

Згідно іншої методики зразок породи досліджуваного пласта (керна), який має встановлені розміри перед початком визначення змочуваності очищують різними розчинниками та дистильованою водою, сушать при температурі від  $+102^\circ\text{C}$  до  $+105^\circ\text{C}$ .

Сам процес визначення змочуваності керна починається з того, що kern занурюють в дистильовану воду при температурі  $20^\circ\text{C}$  на 20 годин. Тоді, не виймаючи kern з води, на аналітичній вазі визначають його вагу  $P_1$ . Далше kern, насичений водою, занурюють на 20 годин у гас, а після цього знову занурюють у воду і визначають у воді вагу насиченого гасом керна  $P_2$ .

Потім kern занурюють у спеціальну посудину з гасом, яка розміщується у центрифугі, і проводять розкручування в центрифугі протягом 30 хв. при факторі розділення  $A=2500$ . Фактор розділення визначається згідно формули:

$$A = \frac{4\pi n^2 R}{g} = \frac{n^2 R}{895}, \quad (2)$$

де  $n$  – кількість обертів за хвилину,  $R$  – відстань від осі центрифуги до центра ваги керна,  $g$  – прискорення вільного падіння ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ).

Після центрифугування визначають вагу керна  $P_3$ . Потім знову занурюють kern у дистильовану воду на 20 годин і визначають у воді вагу  $P_4$ .

На кінець kern встановлюють в центрифугу у посудину з дистильованою водою і в попередньому режимі розкручують 30 хвилин. Потім kern виймають і визначають вагу  $P_5$ .

Показник змочуваності керна визначається на різних стадіях його дослідження, але інтегральна характеристика змочуваності внутрішньопорової поверхні зразка породи розраховується за формулою:

$$M = \frac{P_4 - P_3}{P_5 - P_3} \quad (3)$$

Цей показник  $M$  є величиною безрозмірною. За діапазоном значень величини показника змочуваності  $M$  поверхні порід їхні характеристики змочуваності водою наведено у табл. 1.

**Таблиця 1 – Характеристика поверхні породи за показником змочування**

Показник змочування $M$	Характеристика поверхні породи
0 – 0,2	Гідрофобна
0,2 – 0,4	Переважаю гідрофобна
0,4 – 0,6	Проміжна змочуваність
0,6 – 0,8	Переважаю гідрофільна
0,8 – 1,0	Гідрофільна

Наведена методика забезпечує велику точність визначення змочуваності, але вона вимагає неперервного процесу дослідження протягом 30 діб, що не може задовольняти вимоги виробництва з точки зору продуктивності контролю змочуваності.

Метод визначення ККЗ пористих тіл шляхом вимірювання капілярного тиску [6] вимагає складного обладнання і містить похибку, зв'язану із стисливістю повітря в камері над керном.

Вищенаведені та інші відомі методи визначення змочуваності пористих тіл чи ККЗ дозволяють виміряти тільки статичний ККЗ, досліджувати ж кінетику змочування вони не мають змоги. Крім того вони вимагають складного і громіздкого обладнання, процес вимірювання відбувається протягом великого часу, тобто, вони не мають високої продуктивності контролю.

Існуючі в даний час методи і засоби дозволяють визначати ККЗ плоских монолітних твердих тіл, а не пористих твердих тіл. Тому постала задача створити новий метод визначення ККЗ, який би дозволяв усунути вказані чинники і

проводити оперативно автоматизований процес вимірювання.

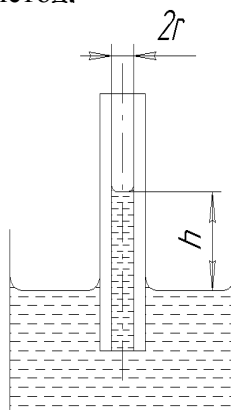
**Мета роботи.** Змочування пористих тіл є одним з показників, що визначають процес витіснення нафти з реальних нафтогазоносних пластів, що обумовлює необхідність оцінки змочування пористих тіл. Така оцінка можлива шляхом вимірювання значень параметрів, які характеризують процес змочування (непрямі вимірювання), або шляхом безпосереднього визначення кількісної характеристики змочування – крайового кута змочування  $\theta$ .

У наукових дослідженнях акцентується увага на визначенні характеру і розподілу змочуваності об'єктів контролю. Ці задачі вимагають оперативності контролю змочуваності та великої кількості актів вимірювання, що можна досягнути сучасними засобами автоматизації та обробки інформації. До цих пір не вирішена проблема точних, оперативних і надійних методів та засобів контролю змочування пористих тіл. Промислових засобів для контролю змочуваності пористих тіл в даний час не існує. Метою дослідження є обґрунтування та розроблення простих і

доступних у виготовленні технічних засобів і методики вимірювання ККЗ пористих тіл, які би дозволяли оперативно проводити вимірювання в лабораторних та промислових умовах.

**Основна частина.** Для вирішення поставленої задачі доцільно вибрати метод,

що не вимагає багатьох допоміжних процедур. Одним з методів визначення ККЗ є метод підняття чи опускання рідини в капілярі  $h$  по відношенню до рівня рідини в посудині (рис. 1).



**Рисунок 1 – Схема методу капілярного підняття**

Висота підйому  $h$  рідини, зв'язана з параметрами трифазної системи наступною формулою [7]:

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{\rho g r}, \quad (4)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу досліджуваної рідини,  $\theta$  – крайовий кут змочування,  $\rho$  – густина досліджуваної рідини,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $r$  – внутрішній радіус капіляру.

Метод вимагає, щоб капілярна трубка була виготовлена з досліджуваного твердого матеріалу, або з внутрішнього боку трубка повинна бути покрита цим матеріалом. Із виразу (4) легко визначити ККЗ.

Цей метод цілком є придатним і для визначення величини ККЗ пористих тіл. Швидкість  $v$  і висоту підйому  $h$  рідини в трубці, заповненій досліджуваним пористим тілом, можна визначити з наступних міркувань.

Швидкість руху рідини по осі циліндричної трубки для ньютонівської рідини визначається такою формулою [8]:

$$v = \frac{\Delta P \cdot r^2}{4\mu \cdot h}, \quad (5)$$

де  $r$  – радіус трубки,  $\Delta P$  – різниця тисків на початку та кінці трубки,  $\mu$  – динамічна в'язкість,  $h$  – довжина трубки.

Висота підйому рідини є мірою величини перепаду капілярного тиску

$\Delta P$ . У випадку вертикальної трубки в різниці тисків слід враховувати гідростатичний тиск стовпчика рідини. Враховуючи, що швидкість переміщення рідини  $v = h/t$ , із (5) знаходимо, що

$$h^2 = \frac{\Delta P \cdot r^2}{4\mu} \cdot t. \quad (6)$$

Величина  $\Delta P$  показує, який тиск необхідно прикласти для підйому рідини на висоту  $h$ . Цей тиск визначається сумою тиску  $\Delta P_{\text{ci}}$ , обумовленого змочуванням стінок трубки

$$\Delta P_{\text{ci}} = \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r}, \quad (7)$$

і гідростатичного тиску  $\Delta \bar{P}$ .

Враховуючи вищевказане, отримуємо, що:

$$h^2 = \frac{r^2}{4\mu} \left( \frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r} + \Delta \bar{P} \right) \cdot t. \quad (8)$$

Отриманий вираз можна використовувати і для визначення  $\cos \theta$  пористих тіл. У цьому випадку величина ККЗ у пористому тілі визначається за допомогою виразу:

$$\cos \theta = \frac{r}{2\sigma} \cdot \left( \frac{4\mu h^2}{tr^2} - \rho g h \right), \quad (9)$$

де  $r$  – радіус пор,  $\mu$  – динамічна в'язкість рідини,  $\theta$  – крайовий кут змочування,  $\sigma$  – поверхневий натяг рідини,  $h$  – висота

підйому рідини в пористому тілі,  $t$  – час руху рідини до повної зупинки,  $\rho$  – густина рідини,  $g$  – прискорення вільного падіння.

Отриманий вираз можна використовувати для визначення  $\cos\theta$  не тільки пористих тіл, але й порошків. Якщо рідина рухається в пористому тілі в горизонтальному напрямку, складовою гідростатичного тиску  $\rho gh$  необхідно знехтувати і замість висоти  $h$  необхідно приймати шлях, пройдений рідиною в пористому тілі за час  $t$ .

Широке використання цього методу до цих пір стримує суб'єктивність при визначенні висоти підйому  $h$  рідини у пористому тілі внаслідок різних радіусів пор та шорсткості поверхні, що спричинює нерівну і розмиту межу між сухою та змоченою частинами пористого тіла, що викликає значну неточність вимірювань.

Вираз (9) строго описує рух рідини в капілярах, однак величина  $r$  тут вимагає певних уточнень. Якщо при русі в окремому капілярі  $r$  – це радіус капіляру, то при русі в пористому тілі  $r$  – еквівалентний радіус порового простору. Значення цього параметра важко точно визначити, так як воно залежить від упаковки, розмірів та форми частинок в пористому тілі та деяких інших факторів [2]. Тому для конкретних випадків змочування пористих тіл при розрахунках за величину параметра  $r$  необхідно брати еквівалентний радіус.

При визначенні ККЗ пористих тіл різними рідинами слід враховувати топологію капілярної системи тіла. Дослідники використовують різні моделі капілярної системи, які з певним ступенем імовірності відтворюють реальні пористі тіла.

В реальних пористих тілах найпридатнішою можна вважати хаотичну модель пористих тіл [2]. У хаотичній моделі вузли знаходяться не в певних строго визначених вузлах ґратки, а у випадкових місцях. Відповідно напрям зв'язків між вузлами також має випадковий характер. Така модель пористого тіла має перевагу в її повній ізотропності, якщо середня довжина

капілярів між вузлами є значно меншою від розмірів пористого тіла.

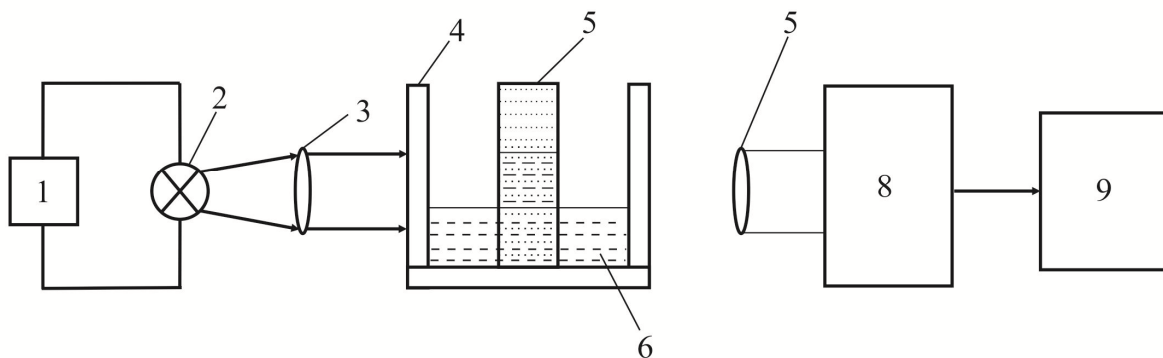
В хаотичній моделі пористого тіла капіляри мають різні поперечні розміри. Форма їх поперечного перерізу не є круглою, але при великій кількості капілярів з високою достовірністю приймають, що всі капіляри мають круглий переріз з еквівалентним радіусом. Для отримання розподілу капілярів за радіусами, близькими до реального розподілу пористого тіла, використовують результати експериментальної порометрії. Методи і прилади для визначення пористості зразків є відомі, наприклад, можна використовувати прилад «Експрес-пор». Встановлене значення пористості зразка дозволяє визначити еквівалентний радіус порового простору [2]. Відомі й інші методи визначення еквівалентного радіуса пор [1, 6], зокрема, з використанням установки ядерного магнітного резонансу [9].

Так як в'язкість  $\mu$  та поверхневий натяг рідини  $\sigma$  є величинами наперед відомими, то, знаючи час руху рідини до повної зупинки  $t$  і величину  $h$ , згідно (9) можна визначити косинус ККЗ:

Висоту  $h$  підйому рідини у пористому тілі можна визначати використовуючи оптичні і сучасні оптоелектронні засоби.

Із ряду відомих методів визначення ККЗ вибрано оптичний метод, який дозволяє проводити вимірювання безконтактним способом, що в свою чергу дозволяє оперативно змінювати контрольований об'єкт чи рідину.

Для підвищення точності та оперативності контролю ККЗ доцільно використати сучасні оптоелектронні засоби, які функціонують сумісно з персональними компютерами (ПК), що дозволяє автоматизувати процес контролю ККЗ. З цією метою розроблено функціональну схему оптоелектронної установки (рис. 2), в якій використано портативний цифровий мікроскоп "Shinevision digitale", за допомогою якого отримується зображення об'єкта на моніторі персонального компютера з потрібним збільшенням [10].



1– блок живлення освітлювача; 2– лампа; 3– конденсор; 4– посудина;  
5– досліджуване пористе тіло; 6– досліджувана рідина  
7– об'єктив цифрового мікроскопа; 8– цифровий мікроскоп;  
9– персональний комп'ютер

**Рисунок 2 – Функціональна схема установки для визначення змочування пористих тіл**

Досліджуване пористе тіло (кern) 5 змочується знизу рідиною 6, яка буде підніматись по капілярах вгору. Змочена частина керна під променями світла із освітлювача буде виглядати темнішою внаслідок поглинання світла. Розглядаючи досліджуване пористе тіло 5 через цифровий мікроскоп 8 на екрані монітора персонального комп'ютера 9 можна розглядати у збільшеному вигляді досліджувану систему. Оскільки лінія розмежування сухої та змоченої частин досліджуваного пористого тіла буде виглядати нерівною і розмитою, то слід використати обробку зображення.

Спеціальне програмне забезпечення цифрового мікроскопа "Shinevision digitale" дозволяє проводити лінійні вимірювання між точками на зображенні на екрані монітора. Безпосередні вимірювання відстані, яка вказується курсором на моніторі, від рівня рідини до видимої лінії підняття рідини в пористому тілі все таки не є достатньо точним внаслідок розмитості лінії підняття рідини.

Для розв'язання цієї проблеми треба буде проводити комп'ютерну обробку зображення за допомогою спеціально розробленої програми. При обробці зображення здійснюються наступні операції: вибір рівня фону (автоматичний або ручний), за який береться суха частина зображення пористого тіла, розпізнавання контуру лінії підняття рідини в пористому тілі; визначення висоти капілярного підняття та крайового кута змочування.

Робота алгоритму починається із визначення рівня фону. В програмі передбачено автоматичний та ручний режим вибору кольору фону. При ручному режимі рівень фону вводить оператор персонального комп'ютера за допомогою спеціального регулятора. Це дає змогу уникнути неправильної обробки при неякісному зображенні. При автоматичному визначенні рівня фону використовується положення регулятора рівня фону як вхідні дані. При автоматичному визначенні рівня фону цей регулятор необхідно встановити в положення, щоб він вказував на градацію кольору між піками 1 і 2 (рис. 3).



**Рисунок 3 – Розподіл пікселів по градаціях сірого**

Пошук точок лінії підняття рідини здійснюється наступним чином: по чергово перебираються пікселі по краях зображення індексами по вертикалі від значення висоти зображення до 1. Умовою знаходження крайнього пікселя є умова, коли колір оброблюваного пікселя стає таким самим

або світлішим від кольору рівня фону. Координати знайдених точок заносяться у позначені змінні.

Щоб алгоритм пошуку межі між змоченою і сухою частинами зображення почав працювати необхідно однозначно знайти першу точку цієї межі. Пікселі послідовно перевіряються з сухої частини зображення на приналежність фону. Коли такий піксель буде знайдено його координати запам'ятовуються у змінних  $i$  та  $j$ .

Дальше запам'ятовані координати точок лінії межі між змоченою і сухою частинами усереднюються і це усереднене значення  $h_m$  запам'ятовується.

Такий алгоритм збільшує точність визначення лінії межі між змоченою і сухою частинами зображення згідно із заданим значенням рівня фону та зменшення впливу завад, які можуть бути присутні на зображенні.

Аналогічно визначається усереднене значення  $h_n$  лінії поверхні рідини в посудині, хоча вона зображається достатньо чітко. Висота підйому  $h$  рідини в пористому тілі визначається за різницею запам'ятованих значень  $h_m$  і  $h_n$ . Накінець величина ККЗ у пористому тілі визначається за допомогою виразу (9). Запропонований метод годиться не тільки для дослідження змочуваності циліндричних кернів, але й для пористих тіл довільної форми.

Враховуючи можливість проведення дослідження змочуваності кернів нафтоносних порід розчинами ПАР в промислових умовах з метою зменшення кількості вимірювальної апаратури чи при її відсутності доцільно використати метод виключення із виразу (9) еквівалентного радіуса пор. Для цього потрібно взяти два зразки гірської породи, які отримані внаслідок розломлення одного керна. В цьому випадку вони матимуть однакову пористість і відповідно однаковий еквівалентний радіус пор. Для обох ідентичних зразків проводиться визначення висоти підйому  $h$  рідини і часу встановлення, тільки для одного зразка з гасом, а для другого – з досліджуваною рідиною. При цьому виходять з наступних міркувань.

Відомо, що чим менша робота когезії, відповідно менший поверхневий натяг рідини, тим краще ця рідина змочує тверде тіло, зокрема гірську породу [7]. Неполлярні вуглеводні, в першу чергу гас, в яких поверхневий натяг становить величину порядку 20 мН/м дуже добре змочують поверхню твердого тіла. Якщо взяти гас, то він володіє майже стовідсотковою змочуваністю матеріалів, можна вважати, що ККЗ гасу з гірською породою буде  $\theta \cong 0$ . Вода ж змочує добре тільки полярні речовини.

Тоді, взявши довідникові значення фізичних величин для гасу (густина  $\rho$ , динамічну в'язкість  $\mu$ , поверхневий натяг  $\sigma$ ) та визначені експериментально значення (висоту підйому гасу в керні  $h_2$ , і час руху гасу до повної зупинки  $t_2$ ) і, підставивши їх у вираз (9), визначиться величина еквівалентний радіус пор. Знайдений еквівалентний радіус пор далі вже використовуватиметься у виразі (9) для визначення змочування другого куска керна досліджуваними розчинами ПАР.

## ВИСНОВКИ

Вищенаведений метод визначення ККЗ дозволяє оперативно досліджувати процес змочування пористих матеріалів технологічними рідинами як в лабораторних, так і в промислових умовах. При використанні даного методу в більшості випадків при наявності у дослідника персонального комп'ютера можна обмежитись тільки придбанням портативного цифрового мікроскопа, вартість якого є на порядок меншою від вартості комп'ютера. В подальшому планується оптимізувати програмне забезпечення обробки зображення межі підйому рідини в пористих тілах та дослідити метрологічні показники.

## Література

1. Використання поверхнево-активних речовин в процесах нафтовидобутку на родовищах ВАТ "Укрнафта" / В.Д. Михайлюк, М.І. Рудий, Р.Т. Боднар та інші / НДПІ ВАТ "Укрнафта", ПП "Галицька друкарня ПЛЮС", 2009 р. 400 с.

2. Бодник А.А. Вимірювання крайового кута змочування на границі розділу фаз / Бодник А.А., Боднар Р.Т., Кісіль Р.І., Стрілецький Ю.Й // *Вимірювальна техніка та метрологія*, Львів, №53, 1998.– С. 80-83.

3. Зимон А.Д. Адгезия жидкостей и смачивание / А.Д. Зимон, М.: "Химия", 1974, 414 с.

4. Contact angle measurement in practice: [Електронний ресурс] // *Kruss. Technical Note*. – Режим доступу: <https://cmi.epfl.ch/metrology/files/Kruss-DSA30/kruss-tn311-315-en.pdf>.

5. Comparison of Wilhelmy and Sessile Drop Technique: [Електронний ресурс] // *Kruss. Technical Note*. – Режим доступу: [http://www.kruss.de/fileadmin/user\\_upload/webside/literature/kruss-tn303-en.pdf](http://www.kruss.de/fileadmin/user_upload/webside/literature/kruss-tn303-en.pdf).

6. Кісіль І.С. Визначення крайового кута змочування пористих тіл шляхом вимірювання капілярного тиску // *Нафтова і газова промисловість*// І.С. Кісіль, Р.Т. Боднар, М.М. Дранчук, м. Київ, №4,2006, с.12-14.

7. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и

растекания / Б.Д. Сумм, Ю.В. Горюнов. М.: Химия. – 1976. – 232 с.

8. Боднар Р.Т. Кісіль І. С., Лютак З.П., Середюк О.Є., Камінський В.Т. "Фізичні основи неруйнівного контролю". Навчальний посібник / Вид. ІФНТУНГ.– 2013, 384 с.– ISBN 978-966-694-181-0

9. Веденін С.В. Визначення середнього діаметра пор гранулярних колекторів нафти і газу імпульсним методом ЯМР / С.В. Веденін, В.М. Винокуров, Т.А. Захарченко та ін. *Геологія нафти і газу*.– 1974. № 4.– с. 47–53.

10. Боднар Р.Т. Оптичний метод експрес-контролю крайового кута змочування. Р.Т. Боднар, Ю.І. Галярник // Тези доповідей 5-ї науково-практичної конференції студентів і молодих учених "Методи і засоби неруйнівного контролю промислового обладнання" 24-25 листопада 2015 м. Івано-Франківськ с. 48–50.

**Поступила в редакцію 15.06.2016 р.**

**Рекомендували до друку:**  
докт. техн. наук, проф. Лютак І. З.,  
докт. техн. наук, проф. Середюк О. Є.