

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВИТІСНЕННЯ РІДИН У МОДЕЛЯХ ПОРИСТОГО ТІЛА

© Бодник А.А., 1998

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Проаналізовано чинники, які мають найбільший вплив на процес витіснення-заповнення рідиними моделями пористих тіл. Встановлено границі, які обмежують використання таких моделей. Показано, що значення крайового кута змочування на границі розділення фаз має визначальний вплив на цей процес.

Дослідження руху рідин через пористі тіла дає можливість отримати важливі результати для багатьох галузей виробництва, у яких застосовують пористі матеріали. З-поміж методів дослідження можна виділити методи з використанням математичних моделей пористих тіл.

Хаотичні моделі пористого тіла відтворюють капілярну систему пористого тіла, використовуючи випадкові значення при створенні топології цієї системи. Результати аналізу різних топологій моделей пористого тіла засвідчили, що саме хаотична топологія моделі найкраще відтворює реальні пористі системи [1]. Її використання в розрахунках дає змогу отримати найбільш достовірні результати. Але як і будь-які інші моделі хаотичні моделі мають свої недоліки, що обмежують їх використання. Описаний нижче аналіз дає можливість встановити межі, за якими отримані результати втрачають достовірність.

Однією із відмінностей розрахункових моделей пористих тіл від реальних пористих тіл є різна кількість вузлів та капілярів в їхніх капілярних системах. Ця різниця може бути значною і з її зростанням достовірність зменшується.

Якщо розглянути чинники, які впливають на процес витіснення-заповнення рідиною, то можна виділити групу основних, вплив яких переважає вплив інших.

При русі рідини в реальних пористих тілах динамічний кут змочування залежить не тільки від фізико-хімічних характеристик контактуючих фаз, але й від швидкості та напрямку руху границі розділення фаз. Це явище має назву гістерезису крайового кута змочування. Значення гістерезису – різниця між кутами натікання та відтікання рідини на границі з твердим тілом. Залежність між значенням крайового кута змочування та швидкістю руху є нелінійною і для різних контактуючих фаз є різною [2]. При русі рідини в реальному капілярі із змінним перерізом та змінними характеристиками матеріалу стінок, ситуація значно ускладнюється.

Наприклад, при переході лінії рідини через зміну перерізу капіляра крайовий кут змочування буде різним по всій границі. Динамічний кут змочування залежить також від геометричних параметрів капіляра, форми його перерізу, наявності в ньому розширення або звуження. При зменшенні швидкості руху лінії рідини значення динамічного кута змочування наближається до свого статичного значення в стані спокою. При зростанні швидкості руху різниця між ними збільшується. При русі рідини тільки під дією капілярних сил у малопроникному пористому середовищі через високу в'язкість рідини і малі розміри капілярів швидкість руху в основному невелика, тому можна вважати крайовий кут незмінним. Отже, при аналізі чинників, які впливають на рух рідини по капілярній системі пористого тіла, зміною крайового кута змочування та його гістерезисом можна нехтувати.

Випадки, коли рідина рухається вздовж капіляра нерозривним потоком, у реальному процесі трапляються рідко. Коли ж потік однієї фази переривається і в ньому з'являються вкраплення іншої фази, то необхідно прикладати додатковий перепад тиску для руху лінії трифазного контакту [3,4].

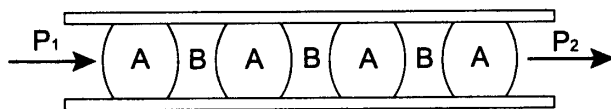


Рис. 1. Рух однієї фази в капілярі з вкрапленнями іншої.

Приклавши до горизонтально розміщеної капілярної трубки, в якій одна фаза розділяється іншою кілька разів, додатковий зовнішній перепад тиску, можна досягти руху фаз у капілярі (рис.1). Швидкість руху рідини буде нелінійно залежати від значення прикладеного перепаду тиску. Швидкість руху також залежатиме від кількості вкрапель однієї фази в іншій. Для початку руху рідини по капіляру потрібно прикласти початковий ненульовий перепад тиску на кінцях капіляра. Це

означає, що до певного граничного значення перепаду тиску рідина залишається нерухомою. Таке явище називається ефектом Жамена і його вплив на процес руху незмішуваних фаз через пористе середовище необхідно дослідити.

Значення мінімального перепаду тиску, при якому рідина почне рухатися, називається критичним перепадом тиску. Рух рідин буде супроводжуватися зміною кривизни границь розділення і кутів натікання і відтікання. У загальному випадку значення критичного перепаду тиску залежить від гістерезису крайового кута, радіуса капіляра, фізико-хімічних характеристик контактуючих фаз. Коли до такого капіляра прикладено перепад тиску, перше вкраплення з боку вищого тиску починає рухатися. За ним починають рух наступні вкраплення аж до останнього. Згідно з законом Жамена, перепад тиску, який необхідний для переміщення вкраплень вздовж капілярної трубки, зростає прямо пропорційно до кількості вкраплень.

У стаціонарному нерухомих стані два меніски, що утворюються на границі розділення фаз, мають однакову кривизну, а отже і тиски, що створюються ними, врівноважені (рис.2).

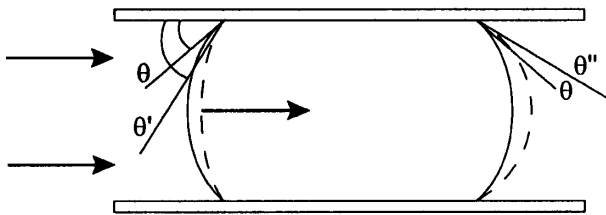


Рис.2. Деформація краплі при прикладенні додаткового перепаду тиску.

Крайові кути θ з обох боків дорівнюють один одному. З моменту прикладення зовнішнього перепаду тиску форма менісків змінюється. Відповідно змінюються і крайові кути на θ' та θ'' . Меніски набирають такої форми, за якої різниця тиску, які вони створюють дорівнюватиме зовнішньому перепадові тиску. Значення цього перепаду тиску ΔP залежить від степені деформації менісків і дорівнює

$$\Delta P = 2\sigma \left(\frac{1}{R''} - \frac{1}{R'} \right), \quad (1)$$

де σ – міжфазний натяг рідин, R'' і R' – головні радіуси кривизни двох капілярних поверхонь розділення фаз.

Ще одним чинником, який впливає на рух рідини, є властивості плівки рідини на границі розділення вкраплення фаза-тверда поверхня. Ця

плівка має підвищену в'язкість і тому при русі краплі виникає додаткова сила тертя, що протидіє рухові. Відповідно зростає значення протидіючого рухові тиску.

Моделювання ефектів Жамена в одиничному капілярі нескладне. Перехід до макроскопічної моделі, тобто моделі в якій цей процес відбувається одночасно в багатьох капілярних трубках, потребує введення чинника, що би відповідав за вплив ефекту Жамена. Цей чинник дає змогу враховувати додаткові втрати тиску на рух вкраплень однієї фази в іншій. Основною відмінністю між природним пористим середовищем та його моделлю, яка створена з циліндричних капілярів, є не такий значний вплив ефектів Жамена в реальному пористому середовищі. Якби вони мали такий же вплив, рух рідини через пористе тіло був би затруднений. У реальному пористому середовищі капіляри ніколи не мають циліндричної форми і тому рідина має можливість перетікати між стінками капіляра та іншою фазою. Крім того, в природних умовах не треба нехтувати можливістю стискування контактуючих фаз і матеріалу скелета пористого зразка.

З проведеного аналізу видно, що стабільність форми лінії витіснення залежить від багатьох чинників. Коли в пористому тілі одна рідина витісняє іншу, лінія витіснення має складну форму. Це можна пояснити флуктуаціями локальних швидкостей руху рідини по капілярній системі, що своєю чергою залежить від локальних характеристик цієї системи. У макроскопічному вигляді нестабільність лінії витіснення необхідно розглядати в регіоні, який містить значну кількість капілярів. Аналіз нестабільності лінії в регіонах, що містять одиничні пори, проводити недоцільно через великий вплив випадкових чинників таких, як розміри радіусів капілярних трубок та топологія їх з'єднання між собою. При розгляді форми лінії витіснення в часі (стати 1, 2 і 3 рис.3) можна відмітити його все більшу деформацію. У початковий момент (стан 1) форма границі розділення має вигляд прямої лінії. Надалі (стати 2 і 3) вона спотворюється, лінія втрачає свою стабільність.

Для малих швидкостей руху лінії, що є типовими, наприклад, для нафтових родовищ, закон Дарсі визначає фазову швидкість v руху кожної рідини як

$$v_i = -\frac{k_i}{\mu_i} (\nabla p_i - \rho_i g) = \nabla \Phi_i, \quad i = A, B, \quad (2)$$

де k_i – фазова проникність для кожної із фаз A і B , μ_i – динамічна в'язкість рідини, θ – густина рідини, g – прискорення земного тяжіння.

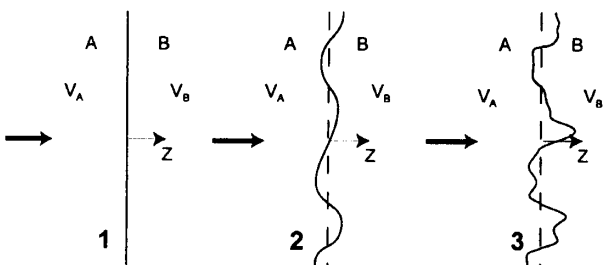


Рис.3. Деформація границі розділення двох рідких фаз у макроскопічному масштабі. Напрямок руху лінії вказаний стрілкою.

Перед збуренням лінії швидкості руху рідин є однаковими. Зміни швидкості, починаючи з моменту деформації лінії рідини, найлегше визначити з умови нерозривності [5]

$$\nabla \cdot v_i = \nabla^2 \Phi_i = 0. \quad (3)$$

З виразу (3) можна визначити, що

$$\Phi_A = b_A e^{\alpha z} f(x, y) e^{\beta x}, \quad (4)$$

$$\Phi_B = b_B e^{-\alpha z} f(x, y) e^{\beta x}, \quad (5)$$

де z – відстань від лінії, що рухається, b_A, b_B, α та β деякі константи, що залежать від початкових та граничних умов.

Зміни швидкостей можна визначити диференціюванням рівнянь (4) і (5). Невідомі константи можна обчислити з умови неперервності нормальної компоненти швидкості і з умови рівності перепаду тиску вздовж всієї лінії рідини статичному капілярному тискові. Аналіз дає можливість визначити коефіцієнт пертурбації

$$\beta = \frac{\alpha(\rho_B - \rho_A)g - \alpha V_A(\mu_A/k_A - \mu_B/k_B)}{(\mu_A/k_A + \mu_B/k_B)}. \quad (6)$$

З виразу (6) видно, що гравітаційні сили можуть або стабілізувати лінію або дестабілізувати залежно від густин двох рідин, які приймають участь у процесі. Якщо витіснення рідин відбувається в горизонтальному напрямку, тобто лінія знаходиться у вертикальній площині, вплив гравітації нульовий.

З виразу (6) можна зробити ще один висновок: «рухливість» (μ_A/k_A) фази A , що витісняє, має більший вплив на стабільність лінії витіснення, ніж фази B . Чим більша різниця між «рухливостями» фаз, тим більша нестабільність лінії витіснення. Цим можна пояснити незадовільні результати

витіснення високов'язкої пластової нафти водою, в'язкість якої є значно нижчою. Ще одним з чинників, що знижує стабільність лінії, є мале значення крайового кута змочування, тобто висока змочувальність скелета. Це можна пояснити більшим значенням капілярного тиску, а отже і швидкості руху в цьому випадку. На практиці це означає, що використання розчинів із високою змочувальною здатністю не завжди спричиняє збільшення коефіцієнта витіснення. Рухаючись капілярною системою пористого тіла рідина вступає, крім чисто фізичної взаємодії з матеріалом скелета, ще й у фізико-хімічну взаємодію. Адсорбція активних реагентів на поверхні твердого тіла та їх перехід з однієї фази в іншу впливають на перебіг процесу. Адсорбцію можна розглядати як своєрідну фільтрацію пористим тілом активних компонентів рідких фаз. При цьому концентрація компонентів знижується в напрямку руху лінії витіснення. Найменша концентрація поверхнево-активних речовин буде на границі розділення двох рідких фаз. Відповідно крайовий кут змочування в цій зоні буде відмінним від крайового кута в інших зонах. Через те, що об'ємний рух рідини в пористому тілі затруднений, не відбувається значного обміну між зонами з вищою концентрацією і зонами з нижчою концентрацією. Отже, можна зробити висновок, що при русі рідини, яка містить поверхнево-активні компоненти в пористому тілі, крайовий кут змочування з часом буде змінюватися. Значення цієї зміни та її знак залежатимуть від активності цих компонентів та адсорбційної здатності матеріалу пористого тіла. Процеси адсорбції особливо сильно впливають при значних відстанях, які проходить рідина по капілярній системі, що має місце при русі, наприклад, пластових флюїдів.

Основною складністю розгляду процесу адсорбції на моделях є відмінність між питомою поверхнею матеріалу пористого тіла та його моделі. Площа капілярної трубки моделі дорівнює площі бічної поверхні циліндра, тобто мінімально можлива при заданому перерізі. У реальному пористому тілі переріз капілярної трубки некруглий. Але вирішальним чинником є фрактальність поверхні твердого тіла, його мікроскопічні нерівності. Все це збільшує питому площу поверхні пористого тіла в декілька разів або порядків порівняно з його моделлю.

З наведеного вище аналізу можна зробити такі висновки: моделі пористих тіл придатні для дослідження процесу витіснення з урахуванням деяких обмежень. Значення крайового кута змо-

чування є визначальним чинником, що впливає на перебіг процесу за умови руху рідини в системі під дією тільки капілярних сил. У разі додаткової дії зовнішнього перепаду тиску вплив крайового кута змочування зменшується. Вплив ефекту Жамена на перебіг процесу витіснення потребує введення додаткового чинника для його врахування.

1. Бодник А.А. Створення імітаційної моделі витіснення рідин у пористому тілі з урахуванням поверх-

невих сил // *Методи та прилади контролю якості*. 1997. № 1. С. 59-63. 2. Чураев Н.В. *Физико-химия процессов массопереноса в пористых телах*. М., 1990. 3. Anthony M. Shwartz, Charles A. Rader, Elaine Huey *Resistance to flow in capillary systems of positive contact angle // Advanced in chemistry series*. 1964. Vol.43. P.250-267. 4. T. D. Blake, J. M. Haynes *Contact angle Hysteresis // Progress in surface and membrane science*. 1973. Vol.6. 5. Clarence A. Miller *Stability of Interfaces // Surface and Colloid Science*. 1978. Vol.10. P.227-293.

УДК 532.61

ВПЛИВ КОЕФІЦІЄНТА ЗБІЛЬШЕННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ НА РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ МІЖФАЗНОГО НАТЯГУ МЕТОДОМ ОБЕРТОВОЇ КРАПЛІ

© Кісіль Р.І., 1998

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

Наведений метрологічний аналіз впливу коефіцієнта збільшення оптичної системи M приладів, які реалізують методику Воннегута визначення міжфазного натягу методом обертової краплі. Вказані граничні значення співвідношень між внутрішнім і зовнішніми радіусами обертової капіляра, а також радіуса обертової краплі.

Найпростішою з погляду технічної реалізації і найточнішою модифікацією вимірювання міжфазного натягу (МН) методом обертової краплі є методика Воннегута [1]. Умовою застосування цієї методики є те, що в процесі вимірювання максимальна довжина обертової краплі $2x_0$ повинна бути не менше ніж у 4 рази більшою за її дійсний максимальний діаметр $2y_0$. Цю умову досить легко виконати при низьких значеннях M ($\sigma \leq 1$ мН/м), оскільки в цьому разі крапля витягується вздовж осі капіляра в циліндр із заокругленими кінцями при низьких швидкостях обертання капіляра ($\omega \leq 300$ рад/с). При цьому МН σ визначають за такою формулою Воннегута, де враховується коефіцієнт збільшення оптичної системи M

$$\sigma = \frac{\Delta\rho \cdot \omega^2}{4} \cdot \left(\frac{y}{M}\right)^3, \quad (1)$$

де $\Delta\rho$ - різниця густин досліджуваних фаз, кг/м³; ω - кутова швидкість обертання капіляра із досліджуваними рідинами, рад/с; y - вимірний максимальний радіус обертової краплі, м.

Згідно з (1) на точність визначення σ , крім похибок визначення $\Delta\rho$ і вимірювання ω і y , суттєво впливає похибка визначення M , оскільки величина M входить в (1) у третій степені.

Перед тим, як проаналізувати вплив похибок результатів визначення M на σ необхідно відмітити, що визначення σ методом обертової краплі є посереднім вимірюванням з однократними спостереженнями відповідних аргументів. Це зумовлено тим, що значення ω і y постійно змінюються в процесі вимірювання внаслідок зміни в часі міжфазного натягу на границі поділу досліджуваних рідин.

Згідно з методикою визначення похибок посередніх вимірювань при однократних спостереженнях аргументів розраховують часткові похідні функції по кожному із вимірюваних аргументів [2]. Ці часткові похідні можна розглядати як складові сумарної похибки вимірювання значення σ . Оскільки функція σ задана степеневим одночленом, то відносна похибка визначення σ в цьому разі лінійно виражається через суму відносних похибок аргументів, помножених на їх степеневі показники в одночлені [2], тобто

$$\varepsilon(\sigma) = b_1 \cdot \varepsilon(\Delta\rho) + b_2 \cdot \varepsilon(\omega) + b_3 \cdot \varepsilon(y) + b_4 \cdot \varepsilon(M), \quad (2)$$

де b_1, \dots, b_4 - степеневі показники кожного із аргументів у (1); $\varepsilon(x_i)$ - відносні похибки вимірювання кожного із аргументів x_i .

Отже, згідно з (2) похибка визначення M буде в три рази суттєвіше впливати на похибку визначення σ порівняно з похибкою вимірювання