

## СТВОРЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ВИТІСНЕННЯ РІДИН У ПОРИСТОМУ ТІЛІ З УРАХУВАННЯМ ПОВЕРХНЕВИХ СИЛ

© 1997, А.А.Бодник

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу

*Запропоновано методику створення моделі пористого тіла для вивчення процесів заповнення-витіснення пористих тіл рідкими фазами. Проаналізовано деякі моделі пористих тіл такі, як ортогональна, сотова і хаотична. Визначено, що хаотична модель повною мірою відповідає вимогам до моделі пористого тіла через свою повну анізотропію. Запропоновано методику створення хаотичної моделі пористого тіла за результатами експериментальної порометрії реальних зразків, що дає змогу наблизити модель до реальних зразків.*

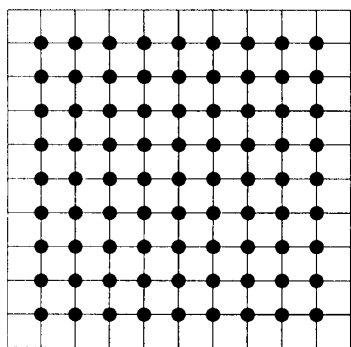
Під час вивчення процесів витіснення або багатофазової фільтрації флюїдів у пористому тілі, а також при вимірюванні крайового кута змочування пористих тіл різними рідинами і розчинами, виникає необхідність глибокого і детального вивчення мікроперетоків рідини по капілярній системі цих тіл. Це дає змогу визначати закономірності цих процесів та чинники, що впливають на їх перебіг. Прямі дослідження на зразках пористого середовища не завжди дають можливість безпосереднього спостереження цих процесів через суб'єктивність дослідника і непрозорість зразка, а також не дозволяють зробити узагальнених висновків щодо впливу різних чинників на процеси витіснення та фільтрації.

З метою вибору топології моделі пористих тіл проводили багато досліджень, в яких використовували різні моделі пористого середовища. Найбільш поширеними моделями є моделі

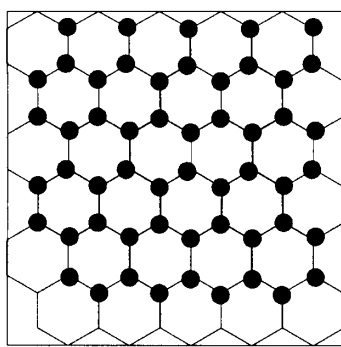
з правильними топологіями, рандомізовані та моделі Бете [4, 5].

Найчастіше використовують класичну модель капілярної системи у вигляді прямокутної сітки з'єднаних між собою циліндричних капілярів (рис.1,а). Капіляри мають різний діаметр і відповідно різний ефективний радіус  $r_{\text{эф}}$ . Витіснення рідин і заповнення цих систем рідинами є найбільш вивченими.

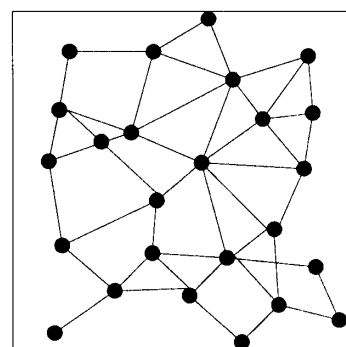
Зручність цієї топології в тому, що для неї легко створити макети. Але в цьому випадку створюється "модель моделі", тому результати досліджень на таких моделях придатні тільки для вивчення послідовності заповнення капілярної системи або витіснення однієї фази іншою. Визначальним недоліком такої топології є те, що вона не відповідає реальним процесам. Тільки деякі штучно створені пористі середовища, наприклад тканини, мають приблизно ортогональне розміщення капілярів.



а



б



в

Рис.1. Ортогональна (а), сотова (б), і хаотична (в) топології моделей пористого тіла.  
[ --- капіляри; • - місця сполучення капілярів].

Для вивчення процесу заповнення капілярної системи використовують також сотову модель (рис.1,б). У ній кут між капілярами в точках їх з'єднання дорівнює  $120^\circ$ . Крім того, при збільшенні кількості сторін правильного багатокутника його форма наближається до форми кола. Це приблизно відповідає насипним моделям пористих тіл, зерна яких мають приблизно сферичну форму.

Спільним недоліком наведених вище двох топологій є їх сильна анізотропія. Під анізотропією топології розуміють відмінність результатів теоретичного та експериментального досліджень процесу витіснення для випадків, коли напрям руху фронту заповнення-витіснення не збігається з напрямом капілярних каналів.

Розглянемо цю проблему детальніше для ортогональної моделі пористих тіл. Якщо напрям руху фронту збігається з віссю капілярів (рис.2,а), то при зовнішньому перепаді тиску рідина рухатиметься в основному по поздовжніх капілярах (розглядається випадок, коли радіус капілярів однаковий). У поперечні капіляри рідина буде заходити тільки під впливом капілярних сил і тільки на початковому етапі. Далі, у процесі стабілізації фільтрації, поперечні капіляри участі в фільтрації не приймають. Якщо повернути систему на  $45^\circ$  (рис.2,б), то у процесі фільтрації рідина буде рухатись по всіх капілярах без винятку. Значить для однієї і тієї ж моделі ми отримасмо різні схеми мікроперетоків і відповідно різні результати.

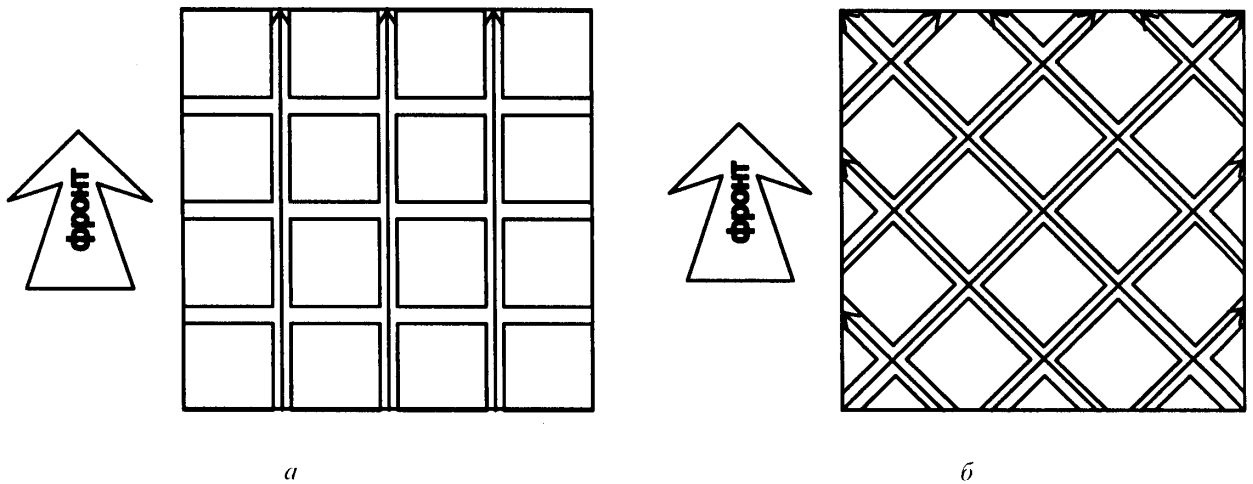


Рис.2. Випадки орієнтації ортогональної топології:  
 а) фільтрація вздовж осей капілярів;  
 б) фільтрація під кутом  $45^\circ$  до осей капіляра.

Для дослідження процесу фільтрації рідин у пористих тілах важливе значення має також такий параметр, як звивистість капілярів, тобто відношення довжини шляху, який проходить рідина рухаючись по реальній капілярній системі пористого тіла, до відстані між відповідними паралельними перерізами цього пористого тіла. Для випадку поздовжньої орієнтації, коли рідина рухається вздовж каналів, значення звивистості дорівнює 1. Коли система повернута на  $45^\circ$ , то звивистість дорівнює  $2\sqrt{2} \approx 2.82$ . Як видно із вищенаведеного тільки від повороту моделі в неї змінюються такі базові параметри, як звивистість, кількість капілярів, які приймають участь у процесі фільтрації. Деякі переваги в

цьому відношенні має модель із сотовою топологією. Для цієї топології на відміну від ортогональної напрям руху фронту не має такого важливого значення. Під час фільтрації рідини в моделях із сотовою топологією приймають участь всі капіляри, незалежно від їх орієнтації.

Одним із суттєвих недоліків наведених вище топологій є їхня абстрактність. У реальних випадках, наприклад, у процесі фільтрації флюїдів у нафтоносних пластах, пористі тіла не мають впорядкованої структури і є досить хаотично складеними з гранул різних розмірів, форм і фізико-хімічних властивостей. Відповідно і форма порових каналів має хаотичний вигляд. Тому виникла необхідність створити імітаційну

модель, яка була б більш близька до реальних пористих тіл на відміну вищенаведених моделей.

Роль такої моделі може виконувати хаотична модель (рис.1,в). У хаотичній моделі вузли, в яких з'єднані капіляри, знаходяться не в певних строго визначених вузлах решітки, як у правильних топологіях, а у випадкових місцях. Відповідно напрям зв'язків між вузлами також має випадковий характер.

Перевагою такої топології є повна ізотропність створеної моделі. Осі капілярів напрямлені у всі можливі напрямки. І тому для цієї топології орієнтація зразка відносно напрямку руху фронту рідини несуттєва. Важливою характеристикою для моделей пористого тіла є координаційне число  $Z$ , яке характеризує скільки в середньому капілярів з'єднується у вузлах решітки. При ортогональній топології до вузла може підходити максимум 4 капіляри, при сотовій 3, тоді ж як для хаотичної моделі кількість капілярів, які підходять до вузла, може бути необмеженою.

Необхідно відмітити, що всі наведені вище топології можна перенести з двовимірного простору на площині (2D) у трьохвимірний простір (3D), що суттєво ускладнює процес аналізу, це дає змогу значно наблизити створену модель до реальних випадків фільтрації.

Методика створення моделі пористого тіла з хаотичною топологією є такою. За основу при створенні моделі вибирають 2D або 3D хаотичну сітку, яка складатиметься з хаотично розкиданих у просторі вузлів і зв'язків між ними, що імітують капіляри. Капіляри повинні мати форму циліндрів заданого радіуса і певної довжини. Довжини капілярів визначають відстань між вузлами, які вони з'єднують.

Радіуси капілярів можна задавати двома способами:

- а) радіуси всіх капілярів однакові;
- б) радіуси капілярів визначаються згідно з результатами порометрії реальних зразків.

Перший спосіб рекомендується застосовувати в тих випадках, у яких для конкретного пористого тіла радіуси всіх капілярів приймають такими, що дорівнюють ефективному радіусові  $r_{ef}$ . На такій моделі зручно визначати послідовність заповнення моделі, але неможливо вивчати вплив радіуса капіляра на процес витіснення і фільтрації. Це суттєвий недолік для моделей, у яких процес витіснення або фільтрації двох фаз залежить від радіуса капіляра. Наприклад, при витісненні вуглеводнів розчинами поверхнево-

активних речовин залежно від гідрофільності чи гідрофобності поверхні пористого тіла витіснення відбувається, в основному або в тонких, або в товстих капілярах. Проте при певних співвідношеннях фізико-хімічних та геометричних характеристик, максимальна швидкість витіснення досягається в капілярах середнього радіуса.

Другий спосіб треба застосовувати тоді, коли необхідно вивчати не тільки послідовність проходження процесу заповнення-витіснення, але й вплив конкретних характеристик пористого тіла на цей процес. Цей випадок складніший для розрахунків. Щоб досягти відповідності реальним результатам дослідження, необхідно враховувати ефект закупорювання капілярів глобулами фаз. Це явище відбувається в реальних зразках на розширеннях/звуженнях пори, а в моделі у вузлах капілярної системи. Найчастіше закупорювання капіляра відбувається при русі рідин із різними поверхневими властивостями на границі розділу із скелетом пористого тіла, наприклад, при витісненні водою нафти у гідрофобно-олефільному зразку. Після закупорювання капіляра, фаза перестас рухатись через цей капіляр і починає перетікати обхідними капілярами. Після закупорки капіляра змінюється розподіл тисків у пористому тілі і процес витіснення набуває іншого характеру.

Перевагою хаотичної моделі є можливість задання степеня ізотропності. Для деяких напрямків осей капілярів можна задавати більшу їх ймовірність порівняно з іншими. Отже у моделі будуть переважати певнонапрямлені капіляри. Для випадку 2D моделей необхідно задавати два коефіцієнти ймовірності  $p_x$ ,  $p_y$  відповідно для кожної з осей координат, для 3D моделей – три коефіцієнти  $p_x$ ,  $p_y$ ,  $p_z$ . У випадку  $p_x=p_y=p_z$  буде отримана повністю ізотропна модель.

Щоб отримати розподіл капілярів по радіусах (густину ймовірностей) близький до реального розподілу пористого тіла, можна використовувати результати експериментальної порометрії або узагальнені закони розподілу пор по радіусах, складені на основі багатьох досліджень пористих тіл [1]. На основі результатів порометрії можливо скласти розподіл пор по радіусах (рис.3,а). За допомогою відомих статистичних методів можна отримати інтегральну (кумулятивну) функцію розподілу випадкової величини  $R - F(R)$  (рис.3,б):

$$P(R < r) = F(r) = \int_{-\infty}^r P(R) dR. \quad (1)$$

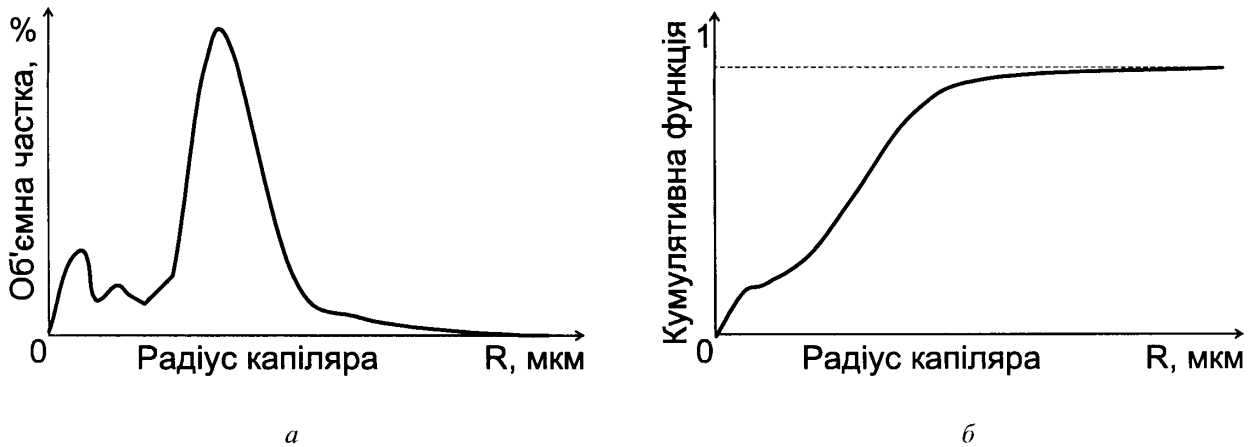


Рис.3. Крива розподілу ймовірностей сумарного порометричного складу (а) та кумулятивна функція розподілу пор по радіусах (б).

При створенні моделі пористого тіла необхідно вирішувати зворотну задачу – за заданою густиною розподілу ймовірностей вибирати радіуси капілярів моделі. Одним з шляхів вирішення цієї задачі є створення генератора випадкових чисел, який видавав би випадкові числа, закон розподілу яких відповідав заданому. Такий метод дає змогу отримати необмежену кількість різних випадкових чисел (радіусів капілярів моделі) із заданим законом розподілу. Окрім того отримання нового випадкового числа не пов'язане з попередніми числами і їхньою кількістю, що дає змогу спростити методику розрахунків. Суть методу полягає у використанні інтегральної функції для заданого закону розподілу і базується на такому статистичному законі: інтегральна функція розподілу, як випадкова величина, рівномірно розподілена на інтервалі (0;1) для будь-якого закону розподілу [2]. Інтегральна функція розподілу випадкової величини  $F^{\circledast}$  неперервна зростаюча функція і тому для неї існує зворотна функція  $F^{-1\circledast}$ . Використовуючи випадкове число рівномірно розподілене в інтервалі (0;1), тобто значення інтегральної функції  $F^{\circledast}$ , і зворотну функцію  $F^{-1\circledast}$ , можемо отримати необхідне значення шуканого випадкового радіуса капіляра моделі.

Після задання топології моделі, тобто розміщення вузлів, зв'язків між вузлами, необхідно задатись фізико-хімічними параметрами речовин, які приймають участь у процесі витіснення.

Процес руху фаз у пористому тілі характеризується взаємодією багатьох чинників. Для кожного окремо взятого капіляра, рух рідини залежить від геометричних характеристик капіляра, фізико-хімічних властивостей контакту-

ючих фаз та перепаду тиску на кінцях капіляра, який своєю чергою залежить від руху рідини у всій пористій системі. Якщо геометричні та фізико-хімічні характеристики можна вважати незмінними, то перепад тиску – величина змінна.

Швидкість руху границі розділення двох фаз у капілярі за рахунок капілярних сил, при умові відсутності зовнішнього перепаду тиску, можна визначити за допомогою залежності [3]:

$$V = \left( \frac{R^2 \sin \alpha}{4(\eta_1 l_1 + \eta_2 l_2)} \right) \left( \frac{2\sigma \cos \theta_0}{R} - \rho g H \right), \quad (2)$$

де  $\alpha$  – кут нахилу капіляра до горизонтальної площини;  $\eta_1, \eta_2$  – динамічні в'язкості фаз;  $H$  – точна висота підняття рідини в капілярі відносно базового рівня;  $\sigma$  – міжфазний натяг;  $\theta_0$  – крайовий кут на границі рідина-тверде тіло;  $R$  – радіус капіляра;  $\rho$  – густина рідини;  $g$  – прискорення земного тяжіння;  $l_1, l_2$  – довжини ділянок, що контактують з фазами.

Створена модель дає змогу проводити розрахунки для хаотичних сіток з урахуванням реального ймовірнісного розподілу радіусів капілярів. Для більш повної відповідності моделі можна задавати для кожного капіляру свої значення крайового кута  $\theta_0$ . Це дасть можливість дослідити вплив варіації значення крайового кута на процес витіснення.

Щоб досягти більшої відповідності моделі оригіналу необхідно враховувати відмінність динамічного крайового кута  $\theta_d$  від статичного  $\theta_0$  [3]. Ці кути майже однакові для малих швидкостей витіснення і в'язких рідин і дуже відрізняються в іншому випадку. Коли в капілярі рухається глобула захопленої рідини або газу, то для високих швидкостей руху необхідно врахо-

увати ефекти Жамена, тобто зміну крайового кута при натіканні та відтіканні.

Розрахунки на моделі можна ввести для трьох випадків:

1. Заповнення попередньо вакуумованого зразка. Всі капіляри зразка в кінці процесу заповнені рідиною.

2. Витіснення газу з пористого тіла. Деякі капіляри зразка перекриті бульбашками газу. У зразку залишаються незаповнені рідиною пори.

3. Витіснення рідини рідиною. У процесі витіснення відбувається захоплення рідких фаз на звуженнях/розширеннях капілярів. У зразку є місця, в яких залишилась невитіснена рідина.

Алгоритм і результати розрахунків для створених моделей і порівняння їх з результатами вимірювань для зразків реальних пористих тіл будуть описані в наступних роботах.

1. Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта. М., 1982. 2. Клейнен Дюж. Статистические методы в имитационном моделировании. М., 1978. Вып.1. 3. Чураев Н.В. Физико-химия процессов массопереноса в пористых телах. М., 1990. 4. Jing-Den Chen, Joel Koplik. Immiscible Fluid Displacement in Small Networks // J. Colloid and interface Sci. 1985. Vol.108. N2. 5. Jing-Den Chen. Some Mechanisms of Immiscible Fluid Displacement in Small Networks // J. Colloid and interface Sci. 1986. Vol.110. N2.

УДК 620.179

## ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАФТОГАЗОВОГО ІНСТРУМЕНТУ

© 1997, І.А.Молодецький

НВФ "ЗОНД", м.Івано-Франківськ

*Наведені основні методи, які застосовують для контролю фізико-механічних характеристик труб нафтового сортаменту на нафтогазових промислах, проаналізовані їх переваги і недоліки, а також можливість підвищення достовірності контролю.*

На сучасному етапі розвитку техніки і технології буріння свердловин для забезпечення безаварійності і високої ефективності робіт необхідно знати фізико-механічні властивості бурильного інструменту та бурового обладнання, що експлуатується, а саме, бурильних труб, які повинні володіти високими міцнісними характеристиками.

За один з показників міцності найчастіше вибирають границю текучості  $\sigma_T$ , що характеризує опір металу малим деформаціям і залежно від якої труби нафтового сортаменту умовно класифікують на групи міцності Д, К, Е, Л, М, Р. Визначення приналежності труби до тієї чи іншої групи міцності дає змогу грамотно компоувати бурильну колону і забезпечити її раціональну експлуатацію.

Аналіз науково-технічної та патентно-ліцензійної інформації методів і засобів неруйнівного контролю (НК) дав можливість зробити висновок про те, що контроль груп міцності найбільш ефективно можна проводити з використанням електромагнітного (точніше, вихрострумове) та акустичного видів неруйнівного контролю.

Вихрострумівий метод (ВСМ) НК ґрунтується на аналізі взаємодії зовнішнього електро-

магнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, наведених збуджуючою котушкою в електропровідному об'єкті контролю. Густина вихрових струмів в об'єкті залежить від геометричних і електромагнітних параметрів об'єкта, а також від взаємного розташування вимірювального вихрострумове перетворювача (ВСП). За виглядом зміни в реальному масштабі часу сигналу від давача розрізняють чотири методи контролю вихровими струмами: основної гармоніки, вищих гармонік, перехідних характеристик (імпульсний), багатопараметровий.

Перетворювачем використовують, переважно, індуктивні котушки (одну або декілька). Синусоїдальний (або імпульсний) струм, діючий в котушках ВСП, створює електромагнітне поле, яке збуджує вихрові струми в електропровідному об'єкті. Електромагнітне поле вихрових струмів діє на котушки перетворювача, наводячи в них електрорушійну силу (ЕРС) або змінюючи їх електричний опір. Реєструючи напругу на затискачах котушки або її опір, отримують інформацію про властивості об'єкта і про положення перетворювача відносно нього. Магнітне поле вихрових струмів направлене протилежно до