

УДК 550.835

ХАРАКТЕРИСТИКА ФІЗИКО-ГЕОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ НАПРЯМКІВ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ КОЛЕКТОРІВ СКЛАДНОЇ БУДОВИ

В.Й.Прокопів, Д.Д.Федоришин

*Івано-Франківська експедиція з геофізичних досліджень в свердловинах,
76002, м. Івано-Франківськ, вул. Українських Декабристів, 54,
тел./факс (03422) 24214, e-mail: exp@il.if.ua*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422)
e-mail: public@ifdtung.if.ua*

Рассмотрены теоретические аспекты петрофизического моделирования горных пород сложного строения. Проведена систематизация направлений моделирования физических и коллекторских свойств, определены перспективные пути создания физико-геологических моделей с целью их использования при интерпретации данных геофизических исследований скважин. На примерах моделирования радиоактивных свойств горных пород показана целесообразность использования предложенных направлений.

The are reviewed the theoretical aspects of petrophysical simulation of composite constitution rocks. There is held the systematization of the main directions of simulation the physical and reservoir properties, the perspective paths of making the physical-geologic models for the purposes of their application at the well logging data interpretation. On the examples of simulation the radioactive properties of rocks there are shown the advisability of the proposed directions.

Завдання удосконалення системи інтерпретації геофізичної інформації при дослідженні фільтраційних і ємнісних параметрів в продуктивних покладах зі складною характеристикою будови колекторів щільно пов'язана з петрофізичним моделюванням. Визначення параметрів, що характеризують геологічний об'єкт, на основі результатів інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень свердловин з високим ступенем достовірності зумовлює необхідність використання петрофізичних моделей, які дають змогу враховувати індивідуальні особливості будови нафтогазових покладів.

Як відомо, петрофізичне моделювання є основою геофізичної інтерпретації, і тому численні наукові та прикладні дослідження присвячено вивченню будови моделей та їх характеристик [1-5].

Розглянемо послідовно можливості і обмеження петрофізичного моделювання геологічних об'єктів та труднощі, які виникають при знаходженні параметрів, що характеризують середовище.

Дослідження гірських порід за фізичними властивостями, які відображаються в геофізичних полях і можуть вимірюватись в свердловинах, зумовлюють необхідність визначення взаємозв'язків між хімічними, фізико-хімічними, мінералогічними і структурними параметрами.

Залежно від фізичної основи поля параметри моделі колектора по-різному описують літологічні властивості, умови утворення гірських порід, співвідношення структурно-літологічних факторів та факторів, пов'язаних з технологією вимірів і системою спостережень при вимірюванні фізичних параметрів. Складний характер відображення параметрів геологічної моделі в

фізичному полі зумовив створення різних форм моделювання петрофізичних властивостей порід.

В загальних рисах петрофізичне моделювання геологічних об'єктів можна поділити на: а) моделі, складені на основі фізичної уяви, які відповідають утворенню геологічних об'єктів та відображенню в фізичному полі; б) математичні моделі, які замінюють реальний геологічний об'єкт системою математичних залежностей, дають змогу в складних геологічних умовах створювати точні співвідношення між характеристиками об'єкта, досліджувати існуючі та визначати ті, що не відображаються в полі; в) експериментальні моделі, які досліджуються на базі створення штучних зразків гірських порід, відповідають диференціації параметрів в геологічному середовищі і задаються штучно; г) моделювання на базі створення колекції зразків з вимірними петрофізичними властивостями і спеціально підібраними для дослідження певної геологічної характеристики об'єкта.

Фізичне моделювання застосовується при обґрунтуванні можливостей і меж застосування геофізичних методів. Наприклад, в методах радіоактивного каротажу активно використовують модель взаємодії нейтронів і гамма-квантів з гірською породою. Досліджуються фізичні властивості породи, які описують її взаємодію з іонізуючим опроміненням. Для характеристики цих фізичних моделей [6] використовуються методи Монте-Карло та багатогрупових розрахунків. Будова моделі повинна враховувати певні умови: енергетичну залежність взаємодії мікроскопічних перерізів пружного і непружного розсіювання, анізотропію пружного розсіювання, радіаційне захоплення теплових нейтронів, поглинання швидких нейтронів.

Моделі перенесення нейтронів і гамма-квантів мають спільні риси, але їхні фізичні особливості відрізняються: для нейтронів діапазон зміни енергії при уповільненні на чотири порядки більший, ніж для гамма-квантів; залежність перерізу взаємодії нейтронів з ядрами атомів від енергії, кута і атомної маси має складний резонансний характер, а для гамма-квантів вказані залежності є повільними функціями. Непружне розсіювання нейтронів не має аналогів у явищах взаємодії гамма-квантів з речовиною. Побудова моделі з використанням фізичних основ процесу дає змогу спрямовано вирішувати геологічні завдання.

Моделювання колекторських властивостей на основі експериментальних даних при вивченні штучних зразків, на думку авторів [2, 4], значно розширює можливість досліджень взаємозв'язків між петрофізичними властивостями гірських порід. Зумовлено це можливостями взаємозв'язків строго контролювати параметри середовища і створювати необхідні діапазони коливань їх значень. Для отримання моделей глинистих, піщано-глинистих і чистих піщанистих порід із заданими властивостями, які адекватні геологічним умовам регіону, необхідно вирішити методичні питання з підготовки мінеральних порошоків, вибору необхідного компонентного і кількісного мінералогічного складу зразка і визначитися з характером і ступенем насичення колектора. Відомі різні способи ущільнення штучних зразків, розроблені різні цементуючі компоненти і схеми їх створення.

Моделювання петрофізичних характеристик і залежностей параметрів гірських порід на базі дослідження колекції зразків керна є одним з найбільш розповсюджених шляхів вивчення властивостей порід-колекторів. Цьому напрямку присвячена значна кількість наукових праць. В даній роботі приділяється значна увага використанню напрямків моделювання петрофізичних залежностей на основі колекції зразків гірських порід, відібраних для дослідження конкретних літолого-структурних горизонтів.

Цей спосіб моделювання дає змогу використовувати методологію однофакторного і багатфакторного експерименту. При вивченні петрофізичних моделей для порід зі складною будовою дуже важливо використовувати багатфакторний експеримент, який дає змогу вибирати більш інформативні характеристики і зменшувати похибку моделювання. Створення колекції зразків є дуже важливим і відповідальним етапом у вивченні характеристик продуктивних відкладів. Основою створення колекції, на нашу думку, є: технологія вибору зразків для дослідження певних петрофізичних характеристик порід з достатнім діапазоном зміни значень параметрів; підготовка зразків кернавого матеріалу для проведення вимірів фізичних властивостей породи. Складність створення колекції значною мірою залежить від технології буріння і будови геологічного об'єкта. Враховуючи сказане вище, при створенні колекції нами були дотримані такі положення: кернавий матеріал відбирався так, щоб забезпечити рівно-

мірне розташування зразків порід по всьому діапазону зміни колекторських властивостей; кернавий матеріал повинен описувати розріз як по вертикалі покладів, так і по площі структури, яка вивчається; враховуючи те, що дослідження проводяться на породах зі складними структурною і мінералогічною характеристиками, кількість відібраних зразків повинна задовольняти нормованому діапазону зміни параметра для окремих петрофізичних властивостей; забезпечення надійності прив'язки керна до геологічного розрізу здійснювалось шляхом порівняння параметра-індикатора з геофізичною інформацією, отриманою зі свердловини відповідним методом.

Нами запропоновано використовувати як параметр-індикатор гамма-спектрометричні дослідження керна. Отримані значення концентрації радіоактивних елементів складають повну характеристику природи гамма-поля і дають змогу ефективно порівнювати його з вимірним полем методу гамма-каротажу.

Математичне моделювання є одним з основних способів дослідження геологічних об'єктів на сучасному етапі в умовах використання обчислювальної техніки при розвідці і вивченні нафтогазових родовищ.

Математичне моделювання – метод дослідження процесів або явищ шляхом побудови їх математичних моделей і вивчення параметрів цих об'єктів. В основу методу покладено ідентичність форми рівнянь і однозначність співвідношень між змінними величинами в рівняннях оригіналу і моделі [6].

Потреба в математичному моделюванні геологічних об'єктів особливо зростає при переході від дослідження достатньо визначених петрофізичних систем (система з простою будовою і мономінеральним складом колектора) до систем зі складною характеристикою параметричного опису геологічного об'єкта. Застосування обчислювальної техніки дає змогу перейти від дослідження процесів однієї фізичної природи з описом одно- або двокомпонентного середовища до вивчення багатопараметричних геологічних об'єктів. Результати дослідження спрощених моделей подавались у вигляді функціональних залежностей і в окремих випадках прирівнювались до того чи іншого закону. Наприклад, залежність часу пробігу пружних хвиль від об'єму порового простору. При цьому припускається, що з визначеною межею точності можливо стабілізувати незалежні змінні системи. Змінюючи за встановленою схемою фіксовані змінні (величини) для спрощених систем, можна визначати потрібні залежності. За визначенням [3] такий шлях отримав назву однофакторного експерименту. Звичайним прикладом методу однофакторного експерименту є дослідження двовимірних моделей петрофізичних зв'язків. Основним недоліком вказаного способу є те, що він передбачає відсутність інших складових взаємозв'язків.

Для складнопобудованих систем неможливо чітко виділити фактори, які впливають на фізичне поле, не можна розмежувати дію різ-

них за природою фізичних явищ, а також неможливо встановити непроникну межу на границях між двома геологічними об'єктами. Параметри системи "колектор" належать до дифузійної системи, в якій фізичні процеси взаємопов'язані. Тому аналіз впливу одного з факторів на залежність, яку вивчаємо, не може привести до позитивних результатів. Система з складноповеденою характеристикою властивостей і взаємозв'язків повинна досліджуватись за методологією багатопараметричного моделювання. З технологічного боку вирішення цієї проблеми на сучасному рівні застосування ЕОМ не є складним.

Хоча загалом геологічні об'єкти належать до складних систем, в практиці геофізичних досліджень дуже часто використовувалися спрощені моделі, одно- або двопараметричні. Пояснення цього факту просте. Комплекс геофізичних методів досліджень свердловин не завжди дає змогу визначати необхідні фізичні параметри, які встановлені в процесі моделювання за технологічними або фізичними причинами проведення вимірювань. Тому для практичного розв'язання геологічних завдань треба обмежувати кількість параметрів в моделі.

Прикладом переходу від багатопараметричного моделювання до спрощеної системи може бути дослідження структури порового простору колектора і зв'язків між фільтраційними і емнісними властивостями колектора. Основним фактором, який зумовлює проникність гірських порід, є структура порового простору [Шейдгер А.Е., 1960 р.; Енгельгардт В., 1964 р.; Ханін А.А., 1969 р.]. Характеристика структури порового простору зумовлена складним співвідношенням різних структурних параметрів. До основних параметрів можна віднести розмір пор та їх форму, шляхи з'єднань між порами, властивості порових стінок, кількість великих пор і малих, їх співвідношення та інші. Значна кількість структурних параметрів і складність їх визначення зумовлює необхідність вибору інтегральних параметрів для практично придатної характеристики властивостей порового простору. Інтегральними параметрами характеристики порового простору, які задовольняють в першому наближенні умовам механіки суцільних середовищ, є відкрита та загальна пористість.

Дослідження руху неоднорідної рідини в поровому просторі вказує на те, що структура порового простору здійснює основний вплив на розподіл фаз рідини і динаміку зв'язку між скелетом породи та рідиною, що насичує колектор. Характеристикою зв'язку структури порового простору з флюїдом є додаткова інформація, яка також описується інтегральним параметром – ефективною пористістю. Таким чином, для характеристики структури порового простору (в широкому застосуванні) приймають інтегральні параметри – відкриту та ефективну пористість і використовують їх для опису фільтраційних властивостей колектора.

Загалом математичною моделлю в петрофізиці є математичний опис явищ, які спостері-

гаються у геологічному розрізі, і який задовольняє менш жорстким вимогам, ніж закон. Математичне моделювання має цілу низку аспектів в підході до створення моделі, вибору системи рівнянь, математичних методів розв'язання систем, вибору параметрів за кількістю і формою відображення в фізичних полях, системи вимірювання параметрів фізичних властивостей. Математичне моделювання нерідко використовує принцип ідеальної моделі, яка дає змогу здійснювати задуманий експеримент на основі теоретичних знань і емпіричних досліджень геологічного середовища. Використання принципу задуманого експерименту значно розширює можливості моделювання і дає можливість сформулювати складні співвідношення між параметрами, однак збільшення параметрів моделі може призвести до неоднозначності при знаходженні оптимальних параметрів моделі.

Розглянуті основні напрямки математичного фізико-геологічного моделювання з певною часткою успіху використовуються при вивченні продуктивних нафтогазових покладів складної будови. Побудова моделей складних колекторів потребує окремих, індивідуальних шляхів. Проблема дослідження колекторів складної будови пов'язана з нестандартною характеристикою полів, з одного боку, і загальновідомими розв'язками прямих геофізичних задач для об'єктів з колекторами простої структури, з іншого боку. Нестандартність геофізичної характеристики має чимало різновидів, які створюють великі проблеми в процесі моделювання. Підвищення достовірності геологічної інтерпретації геофізичної інформації може бути здійснене за рахунок нових підходів при моделюванні. Розглянемо нові напрямки при фізико-геологічному моделюванні.

При моделюванні головною вимогою є відповідність модельних побудов реальному відображенню експериментально отриманих геолого-геофізичних параметрів. Умова відповідності модельних побудов геологічному середовищу створює значні переваги при вивченні геологічного розрізу. Така модель дає змогу створювати точне математичне співвідношення між характеристиками об'єкта дослідження; вивчати важливі петрофізичні характеристики порід, які експериментально дослідити дуже важко, враховуючи нестаток зразків із значною диференціацією значень параметра.

Вказані позитивні сторони дали підставу нам запропонувати два нових напрямки моделювання, в основу яких покладено застосування особливостей процесу вимірювання геофізичного параметра, а саме :

– побудова фізико-геологічної моделі на основі використання інформації про динамічні параметри геологічного об'єкта, котрі можна отримати в процесі вимірювання фізичних параметрів;

– побудова фізико-геологічної моделі на основі використання фактора адекватності процесу виміру петрофізичних параметрів в свердловинних і лабораторних умовах.

Розглянемо приклади, які вказують на можливість впровадження пропонованих напрямків моделювання.

Вивчення потенціалів самочинної поляризації в гірських породах є одним з найбільш розповсюджених геофізичних методів. Розв'язанню прямих і обернених задач для методу потенціалів самочинної поляризації присвячена чимала кількість наукових праць. Фундаментальні дослідження використання методу для вивчення геологічних об'єктів проведені Б.Ю.Вендельштейном, В.Н.Дахновим та ін. На нашу думку, аналіз і дослідження моделей потенціалів самочинної поляризації актуальна і в теперішній час при дослідженнях складнобудованих теригенних колекторів.

Джерела потенціалів самочинної поляризації виникають в свердловинах за певних умов зразу після розкриття продуктивних пластів і зумовлені глибинними процесами, які виникають при взаємодії промивальної рідини з колектором. При розкритті колекторів, насичених нафтою або газом, переважно виникають дифузійно-адсорбційні і фільтраційні процеси. Дифузійно-адсорбційні процеси утворюють електричний потенціал, джерело якого подається як сукупність електричних диполів, розташованих на поверхні контакту різнохарактерних середовищ і відповідає поняттю подвійного електричного шару. Електричний потенціал, що утворюється при протіканні фільтраційного процесу, виникає на межі капілярного середовища, через яку відбувається фільтрація. Різниця тисків "свердловина – пласт" визначає величину цього потенціалу. Як бачимо, джерелами потенціалів самочинної поляризації в свердловині є фізико-хімічні процеси. Виникнення і протікання цих процесів мають дуже складну фізичну основу, але ці фізико-хімічні явища описуються фізичними моделями, що дає змогу проводити фізико-геологічне моделювання і аналізувати геолого-геофізичні можливості методу.

Відомо, що система "свердловина – пласт" — складна динамічна модель. Вона визначає наявність електрхімічних потенціалів, величину їх амплітуди, співвідношення потенціалів дифузійно-адсорбційних і фільтраційних, характеристики зміни потенціалу, методичні особливості системи спостереження. Інформація про потенціал самочинної поляризації при дослідженні динамічної моделі дає змогу вивчати не тільки геологічні параметри середовища, їх взаємозв'язок з електричними потенціалами, але й досліджувати важливий параметр — похибку системи спостереження при проведенні геофізичних досліджень.

Моделі потенціалів самочинної поляризації, які використовуються в теперішній час на виробництві, описують характеристику електричних потенціалів дифузійно-адсорбційної природи, але моделі такого плану не враховують часовий фактор, що значно звужує діапазон можливостей методу. В роботі [7] пропонується динамічна модель потенціалів самочинної поляризації, і на фактичному геолого-геофізичному матеріалі вказуються можливості вивчення

складнобудованого колектора методом ПС. Дослідження потенціалів самочинної поляризації у факторі часу значно підвищує інформативність методу за рахунок додатково вимірених геофізичних параметрів. Вказаний приклад дає підстави позитивно сприймати пропонований напрямок моделювання на основі використання динамічних параметрів фізичних величин.

Для характеристики іншого напрямку побудови фізико-геологічної моделі розглянемо модель природної радіоактивності, яка вимірюється інтегральним гамма-методом при визначенні глинистості гірських порід.

В практиці геофізики досліджень використовується відома універсальна модель [3]

$$\Delta I_{\gamma} = F(C_{\text{гл}}), \quad (1)$$

де: ΔI_{γ} – покази гамма-методу, подані в одиницях подвійного різницевого параметра, $C_{\text{гл}}$ – масова глинистість пласта.

Представлена залежність вважається нелінійною [В.В.Ларіонов] або лінійною [Д.А.Кожевніков]. Така розбіжність в характеристиці фізико-геологічної моделі гамма-методу викликає необхідність дослідження можливих причин форми залежності. На думку М.М.Еланського [3], доцільно прийняти дві моделі. На нашу думку, при дослідженні широкого діапазону зміни масової глинистості породи змінюється і величина питомої радіоактивності глинистої фракції. Адсорбційні і мінералогічні характеристики глин відрізняються у породах крупно-уламкових і дрібноуламкових. Різні адсорбційні властивості зумовлюють різний внесок радіоактивних елементів у величину гамма-випромінення навіть при однакових умовах басейну осадконакопичень. Показник ступеневої функції зумовлений різницею умов формування гірських порід. Лінійний характер моделі можна представляти тільки в обмежених межах зміни глинистості і за наявності цементу з глинистою основою. Розглянута характеристика зміни виду залежності заснована на використанні геолого-мінералогічних параметрів.

Виміри значень природної радіоактивності гамма-поля в свердловинах залежать від спектральної характеристики гамма-випромінювання, геометричних умов експерименту, реакції детектора NaI(Tl) і впливу фільтра, який оточує детектор. Вплив фільтра проявляється при вимірах в середовищах із значними властивостями розсіювання гамма-випромінювання, до яких виносяться гірські породи. Природна радіоактивність теригенних порід зумовлена концентраціями радіоактивних елементів K^{40} , $U(Ra)$, Th . Вміст цих елементів пов'язаний з масовою глинистістю в породах мономіктового складу. Породи-колектори складної будови характеризуються невідповідністю кількості глинистого цементу і концентрації радіоактивних елементів. Енергетичний спектр цих елементів знаходиться в межах 0,6...2,9 MeV. Розсіювання гамма-квантів від джерел різної енергії визначає радіус зони надходження іонізуючого випромі-

нення з навколосвердловинного простору до детектора.

Розглянуті фактори обмежують можливість використання методу ГК при дослідженні колекторів складної будови. Пропонується при створенні фізико-геологічної моделі використовувати фактор адекватності, який виражається так:

$$\Delta I_{\gamma} = F\left\{C_{zn}, \xi(q^k)\right\}, \quad (2)$$

де: $\xi(q^k)$ – функція адекватності, яка визначає ступінь відображення різних складових джерела гамма-поля і реакції сцинтиляційного датчика на процес виміру значень ГК; q^k – питома радіоактивність джерела природного гамма-поля; $k=1,2,3$ – компоненти різних енергій природного джерела гамма-поля.

Дослідження функції адекватності дасть змогу зменшити похибки при побудові моделей, в основі яких лежать невідповідності результатів вимірів параметрів ядерного матеріалу та реального геологічного середовища.

Випромінені гамма-промені при розповсюдженні в породах поглинаються або розсіюються, при цьому змінюється напрям першопочаткового руху та їх енергія. Утворене гамма-поле залежить від властивостей ядер (енергії випромінювання), розподілу квантів за кутами розсіювання та від властивостей середовища, яке їх поглинає. Таке поле відображає характерні особливості джерела гамма-квантів і середовища, яке їх поглинає. При описі характеристики джерела використовують точковий моноенергетичний випромінювач. Гірська порода є джерелом з багатокомпонентним енергетичним складом. Надходження гамма-квантів до детектора буде характеризуватися різним шляхом проходження квантів. В нашому випадку джерело можна представити різними рівнями виходу гамма-променів, що призведе до збільшення кількості гамма-квантів великих енергій. В лабораторних умовах за рахунок малих розмірів зразка цей ефект зводиться до рівня шумових перешкод.

При дослідженні колекторів складної будови різнорівневе надходження гамма-квантів ускладнює інтерпретацію інтегрального гамма-методу. Нами проводились розрахунки інтенсивності гамма-поля за методом експоненційного наближення розсіювань з врахуванням багатократного розсіювання гамма-квантів за

$$I(l) = I_0(l) \cdot e^{-k\rho l}, \quad (3)$$

де: $I_0(l)$ – інтенсивність гамма-випромінювання джерела в точці l (наприклад, на поверхні джерела) за умови відсутності поглинаючого середовища; k – середній масовий коефіцієнт сповільнення гамма-випромінювання; ρ – густина середовища.

Розрахунки свідчать, що зміни концентрацій U(Ra) і Th мають більший відсоток надходжень гамма-квантів. Використання моделі з врахуванням фактора адекватності підвищить ефективність визначення глинистості порід.

Запропоновані напрямки фізико-геологічного моделювання, які використовують фактор адекватності процесу вимірювання фізичних параметрів в середовищі до параметрів системи спостереження та інформацію про динамічні параметри геологічного об'єкта, які можна отримати в процесі вимірювання фізичних параметрів, підтверджуються розглянутими прикладами. Пропонований шлях значно підвищить достовірність побудови фізико-геологічної моделі при інтерпретації геофізичної інформації.

Література

1. Кобранова В.Н. Физические свойства горных пород. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 490 с.
2. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. – М.: Недра, 1975.
3. Элланский М.М. Петрофизические связи и комплексная интерпретация данных промысловой геофизики. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
4. Леонтьев Е.И. Моделирование в петрофизике. – М.: Недра, 1978. – 125 с.
5. Гулин Ю.А. Гамма-гамма метод исследования нефтяных скважин. – М.: Недра, 1975. – 160 с.
6. Гладкий В.С. Вероятностные вычислительные модели. – М.: Недра, 1965.
7. Прокопів В.И. Об использовании фильтрационных потенциалов самопроизвольной поляризации при определении характера насыщения сложнопостроенных терригенных коллекторов // Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений. – Львов, 1990. – № 27. – С. 34 – 39.