

АПАРАТУРНО-МЕТОДИЧНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НАФТОГАЗОВИХ КОЛЕКТОРІВ У ПРОЦЕСІ БУРІННЯ ТА В ОБСАДЖЕНИХ СВЕРДЛОВИНАХ

Сергій
ДАНИЛІВ

директор
ТОВ «Укрспецприбор»

Володимир
КАРМАЗЕНКО

інженер-геофізик,
фізична
особа-підприємець

Олег
СТАСІВ

директор
ТОВ «Укрспецгеологія»

Максим
БОНДАРЕНКО

кандидат геологічних
наук, старший
науковий співробітник
Інституту геофізики
ім. С.І. Субботіна
НАН України

Володимир
КУЛИК

кандидат фізико-
математичних наук,
старший науковий
співробітник,
провідний науковий
співробітник
Інституту геофізики
ім. С.І. Субботіна
НАН України

Представлено результати розроблення апаратурно-методичних комплексів для актуальних напрямів геофізичних свердловинних досліджень нафтогазових колекторів: каротажу в процесі буріння (зокрема, горизонтальних свердловин); каротажу на кабелі в обсаджених свердловинах. Комплекси ґрунтуються на використанні методів радіоактивного каротажу, які є ефективними за наявності у свердловині сталевих труб (бурильної чи обсаджених): інтегрального гамма-каротажу, нейтрон-нейтронного каротажу, нейтрон-гамма-каротажу і густинного гамма-гамма-каротажу.

Розвинуто новий підхід до створення універсального малогабаритного комбінованого приладу радіоактивного каротажу для дослідження нафтогазових колекторів у процесі буріння через цільні бурильні труби.

Створено комбіновані прилади для каротажу в процесі буріння та в обсаджених свердловинах: LWD-КПК-48 (діаметр – 48 мм) і WL-КПК-42 (діаметр – 42 мм). На повномасштабних фізичних моделях отримано градувальні характеристики приладів для типових умов проведення каротажу.

Розроблено основні елементи інтерпретаційно-методичного забезпечення для визначення петрофізичних параметрів нафтогазових колекторів. Створені апаратурно-методичні комплекси дають змогу визначати основні петрофізичні параметри: глинистість, густину, пористість, характер насичення та ін.

Свердловинні випробування показали високу інформативність та ефективність розробки. Апаратурно-методичні комплекси є універсальними, зручними та більш доступними для каротажних фірм у порівнянні з відомими аналогами.

Результати виконаних робіт засвідчили перспективність використання в Україні розроблених апаратурно-методичних комплексів. Українські розробники володіють необхідним набором ідей, ноу-хау і можливостей для розширення, вдосконалення розробки та її комерціалізації.

Ключові слова: каротаж у процесі буріння; горизонтальна свердловина; каротаж на кабелі; обсаджена свердловина; нафтогазовий колектор; комбінований прилад радіоактивного каротажу; інтерпретаційно-методичне забезпечення; петрофізичний параметр.

ВСТУП

Пошуки, розвідка й освоєння нових нафтогазових родовищ для України є головними завданнями. Разом із цим у найближчі роки для швидкого нарощування обсягів видобування вуглеводнів доцільно спрямувати увагу на родовища, які експлуатуються, та на вже розвідані родовища. Одним зі шляхів вирішення означених завдань є скероване буріння, зокрема бічних відгалужень з уже наявних свердловин, та дослідження розрізу обсаджених свердловин.

Скероване буріння (з наявних чи нових вертикальних свердловин) бокових похилих відгалужень, що закінчуються горизонтальним інтервалом безпосередньо в пласті-колекторі, є передовою технологією, яка дає змогу значно збільшити площу контакту «свердловина – колектор». Ця технологія є ефективною для розкриття дрібних ізольованих об'єктів, тонкошаруватих покладів, потужних тріщинуватих колекторів та ін. Головні переваги такої технології – збільшення продуктивності (в 3–4, а в деяких випадках у десятки разів), а також зменшення собівартості продукції.

Для буріння похилих та горизонтальних свердловин необхідна геонавігація (тобто направлена провідка свердловини по запланованій траєкторії) та контроль за бурінням, які виконують за допомогою комплексу вимірювань у процесі буріння (англ. *measurement while drilling – MWD*). Надзвичайно важливо також у режимі реального часу отримувати геофізичні дані про розріз. Для кількісного оцінювання петрофізичних параметрів колекторів проводять каротаж у процесі буріння (англ. *logging while drilling – LWD*). Крім того, дані LWD використовують для прив'язки траєкторії свердловин з урахуванням геологічних особливостей та оцінки положення свердловини стосовно меж пластів і контактів між флюїдами (Allen et al., 1989; Bonner et al., 1992; Ellis & Singer, 2008).

Комерційне впровадження технології LWD передові західні фірми почали в кінці 1980-х – на початку 1990-х років ХХ ст. (Allen et al., 1989; Bonner et al., 1992; Ellis & Singer, 2008), у Росії – значно пізніше (Прибор 2ННК-ГГКлп-LWD-121, 2014; Прибор Луч-М-2014, 2014). В Україні перший прилад для каротажу в процесі буріння (модуль двозондового нейтрон-нейтронного каротажу за тепловими нейтронами (2ННКт) було створено, випробувано і впроваджено в 2015 році фірмою ТОВ «Укрспецприбор» (Модуль 2ННКт-LWD. *Руководство по эксплуатации, 2015*). У 2017 році ТОВ «Укрспецприбор» разом із групою ядерної геофізики Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (ІГФ НАНУ) розробили новий оригінальний апаратурно-методичний комплекс радіоактивного каротажу (АМК РК) для LWD-досліджень.

Актуальність геофізичних досліджень нафтогазових колекторів в обсаджених свердловинах (ОС) зумовлена такими завданнями: ревізія свердловин старого фонду (ССФ), контроль за нафтогазонасиченням в процесі розроблення, моніторинг свердловин

підземних сховищ газу, необхідність термінового обсаджування свердловин (наприклад, під час буріння в ускладнених геологічних умовах) та ін.

ТОВ «Київський завод «Геофізприлад» та ІГФ НАНУ з початку 2000-х років вели спільне розроблення комбінованих приладів РК для каротажу в необсаджених і обсаджених свердловинах. За цей час створено серію комбінованих приладів ННК за повільними, надтеповими й тепловими нейтронами (+ гамма-каротаж): СНК-73, СНК-76, СНК-89, а також РК-89 (в якому вперше у світовій практиці використано двозондовий нейтрон-гамма-каротаж). Прилади мають покращені геофізичні характеристики (зменшена статистична похибка, підвищена глибинність дослідження, висока чутливість до петрофізичних параметрів) й успішно використовуються в Україні (ТОВ «Укрспецгеологія») та в Азербайджані.

У 2019 році ТОВ «Укрспецприбор», ТОВ «Київський завод «Геофізприлад» та ІГФ НАНУ здійснили розроблення АМК РК для дослідження ОС (у тому числі через насосно-компресорну трубу (НКТ)).

КОМПЛЕКС РАДІОАКТИВНИХ МЕТОДІВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Застосування методів радіоактивного каротажу (РК) у LWD-технології ґрунтується на можливості працювати через бурильну трубу й на високій інформативності РК. Використанню методів РК під час LWD сприяє також практична відсутність зони проникнення фільтрату бурового розчину в пласт, відсутність зони кольматації та глинистої кірки.

Радіоактивні методи найбільшою мірою відповідають фізичним умовам каротажу в обсаджених свердловинах: наявність однієї або двох сталевих колон (а в багатьох випадках ще й НКТ), розформована зона проникнення (в ССФ) або така, що не встигла сформуватися (у терміново обсаджених свердловинах), а також вимогам продуктивності й економічності за високої ефективності (Кузнецов и Поляченко, 1990).

До методів радіоактивного каротажу, які широко застосовують під час LWD та в ОС, належать: інтегральний гамма-каротаж (ГК), нейтрон-нейтронний каротаж (ННК), густинний гамма-гамма-каротаж (ГГК), а також нейтрон-гамма-каротаж (НГК).

Метод ННК реалізують у виді двозондового варіанта (2ННК). Це дає можливість використати відношення показань меншого (МЗ) і більшого (БЗ) зондів – спосіб компенсаційного нейтронного каротажу (КНК). Спосіб КНК дає можливість значною мірою нівелювати вплив низки факторів під час визначення пористості, а саме: мінералізації порового флюїду, параметрів свердловини і її заповнення, приладу і його положення у свердловині тощо (Кузнецов и Поляченко, 1990; Хаматдинов и др., 1989). При цьому для низки задач інформативними можуть бути також індивідуальні зонди (однозондовий нейтрон-нейтронний каротаж – 1ННК) у комплексі з КНК (Кулик та ін., 2006).

Для реалізації методів ННК і НГК використовують Pu-Be або Am-Be джерела нейтронів.

Метод густинного ГГК під час LWD має свої особливості у зв'язку зі значною товщиною стінок бурильних труб (БТ) – до 50 мм. Західні й услід за ними російські фірми (*LWD-ADN tool, 2003; Прибор 2ННК-ГГКлп-LWD-121, 2014; Прибор Луч-М-2014, 2014*) пішли шляхом створення колимаційних «вікон» у бурильній трубі навпроти детекторів і джерела гамма-квантів. При цьому «приладом» слугує сама труба з вмонтованими в ній датчиками та джерелом γ -квантів ^{137}Cs . Такий підхід дає змогу виконувати літолого-густинний каротаж.

Комбіновані прилади РК на основі бурильної труби є доволі громіздкими та важкими (наприклад, прилад LWD-ADN (*LWD-ADN tool, 2003*) має довжину 6,6 м, вагу – 907 кг), що створює труднощі у роботі з такими приладами як на фізичних моделях, так і під час свердловинних вимірювань.

Є приклади успішного застосування густинного ГГК у складі комбінованих приладів РК для дослідження розрізу обсаджених свердловин (*CHAT tool, 2019*). Для цього завдання розробляють прилади з двома і більше зондами, з можливістю врахування властивостей прошарку між приладом і гірською породою, відмічають перевагу використання джерела ^{60}Co (*Ellis et al., 2004; Ellis & Markley, 2007*).

Застосування методів РК за різних видів каротажу мають спільні ознаки. Методи РК добре розвинуті й широко використовуються (*Кузнецов и Поляченко, 1990; Ellis & Singer, 2008*). Разом з тим нові підходи щодо розроблення апаратури й методики інтерпретації дають змогу розширити можливості РК в умовах LWD і в обсаджених свердловинах.

Комплекс методів ГК, ННК, НГК та ГГК є оптимальним для визначення петрофізичних параметрів нафтогазових колекторів під час LWD та каротажу на кабелі в ОС. Використання окремо індивідуальних методів РК не дає змоги визначити необхідну сукупність петрофізичних параметрів нафтогазових колекторів. Водночас комплексне застосування ГК, ННК, НГК та ГГК дає можливість отримати кількісні значення практично важливих параметрів, а також розширює сукупність визначуваних петрофізичних параметрів.

ТОВ «Укрспецприбор», ТОВ «Київський завод «Геофізприлад» і ІГФ НАНУ спільно ведуть розробки АМК РК для актуальних завдань промислової геофізики. Випробування нових АМК РК та їхнє використання під час розв'язання виробничих задач проводить ТОВ «Укрспецгеологія».

НОВІ КОМБІНОВАНІ ПРИЛАДИ РАДІОАКТИВНОГО КАРОТАЖУ

Прилад LWD-КПРК-48. Для LWD горизонтальних свердловин (з відносно тонкостінними БТ – до ~ 30 мм) створено універсальний комбінований прилад радіоактивного каротажу діаметром 48 мм – LWD-КПРК-48.

Прилад центрується у відповідній цільній бурильній трубі (*Данилів та ін., 2020*). Реалізація такого

приладу можлива, як засвідчили виконані експериментальні роботи, якщо в пристрої густинного ГГК замість джерела ^{137}Cs (енергія гамма-квантів $E_0 = 0,66$ МеВ) використати джерело ^{60}Co з більш високою енергією $E_0 = 1,17$ і $1,33$ МеВ. Використання джерела ^{60}Co завдяки збільшеній проникності гамма-квантів підвищує глибинність густинного ГГК.

Комбінований прилад радіоактивного каротажу LWD-КПРК-48 складається із двох компонентів: модуля 2ННК+2НГК і модуля 2ГГК+ГК.

Модуль 2ННК+2НГК: двозондовий пристрій ННК за тепловими нейтронами (2ННК), двозондовий пристрій нейтрон-гамма-каротажу (2НГК).

Важливою особливістю нейтронного модуля є підвищена глибинність НГК завдяки розширеному просторовому розподілу γ -квантів радіаційного захвату та збільшеній довжині зондів НГК.

Модуль 2ГГК+ГК: двозондовий пристрій густинного гамма-гамма-каротажу (2ГГК), зонд інтегрального ГК (він же вимірювач γ -фона для детекторів пристроїв 2ГГК і 2НГК).

Модульна конструкція зручна для проведення градування на фізичних моделях гірських порід, під час транспортування, виконання робіт на свердловині, що буриться, обслуговування тощо. Перед установкою в бурильну трубу модулі з'єднують і прилад центрують у БТ за допомогою спеціальних центраторів-амортизаторів. Між внутрішньою стінкою бурильної труби й захисним кожухом модулів РК, а також між зовнішньою стінкою труби й стінкою свердловини під час проведення LWD циркулює промивальна рідина.

Загальна довжина приладу LWD-КПРК-48 – 4100 мм; вага – 25 кг; робочий діапазон температур – від -10°C до $+150^\circ\text{C}$; максимальний гідростатичний тиск – 80 МПа.

На *рисунку 1* зображено схеми модулів приладу LWD-КПРК-48.

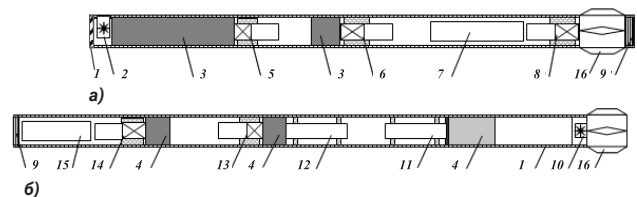


Рисунок 1. **Схема модулів приладу LWD-КПРК-48**

а) модуль 2ГГК+ГК; б) модуль 2ННК+2НГК

- | | |
|---|--|
| 1 – кожух приладу; | 12 – детектор нейтронів БЗ 2ННК; |
| 2 – джерело γ -квантів; | 13 – детектор γ -квантів МЗ 2НГК; |
| 3, 4 – екрани; | 14 – детектор γ -квантів БЗ 2НГК; |
| 5 – детектор γ -квантів МЗ 2ГГК; | 15 – блок електроніки; |
| 6 – детектор γ -квантів БЗ 2ГГК; | 16 – центратори-амортизатори |
| 7 – блок пам'яті; | |
| 8 – детектор ГК, він же вимірювач γ -фону; | |
| 9 – роз'єм модулів; | |
| 10 – джерело нейтронів; | |
| 11 – детектор нейтронів МЗ 2ННК; | |

Наразі виготовлено малу серію приладів LWD-КПРК-48, які успішно випробувано замовниками під час вирішення виробничих завдань.

Прилад WL-КПРК-42. Призначений для дослідження обсаджених свердловин, у тому числі через НКТ (WL – від англ. wireline logging – каротаж на кабелі).

Прилад складається з двох компонентів: модуля 2ННК+2НГК і модуля 2ГГК+ГК.

Конструкцію зондової частини приладу (довжина зондів, розміри й матеріал екранів, матеріал кожуха) оптимізовано з метою покращення його геофізичних характеристик в умовах обсаджених свердловин: збільшено глибинність дослідження, підвищено чутливість до шуканих параметрів, зменшено статистичну похибку вимірювань.

Джерелом гамма-квантів служить ^{60}Co .

На *рисунку 2* представлено схеми модулів приладу WL-КПРК-42.

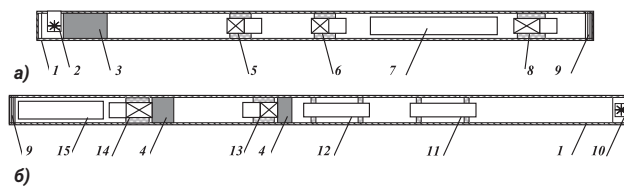


Рисунок 2. **Схема модулів приладу WL-КПРК-42**
а) модуль 2ГГК+ГК; б) модуль 2ННК+2НГК
(Позначення див. на *рисунку 1*)

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НОВИХ ПРИЛАДІВ

Під час розроблення метрологічного забезпечення всіх пристроїв комбінованих приладів РК ми користуємося термінологією, яку запропонував В.М. Лобанков (Лобанков, 2016).

Градуювання приладу – сукупність метрологічних операцій на повномасштабних фізичних моделях пластів, за допомогою яких встановлюють відповідність між показаннями приладу (за заданих умов «прилад – свердловина – пласт») та низкою значень вимірюваного параметра (в прийнятих одиницях).

Під час градування між аргументом (петрофізичний параметр) і значеннями функції (показання приладу за кожного значення параметра) встановлюють певну функціональну залежність, яка називається градувальною характеристикою.

Для отримання шуканого параметра під час проведення каротажу застосовують калібрувальну функцію (КФ) – функціональну залежність вимірюваного параметра від показань приладу.

Тобто під час інтерпретації аргументом виступає показання приладу в досліджуваній свердловині, а функцією – шукане значення петрофізичного параметра.

У сучасних умовах, коли серія однотипних приладів відносно невелика (може бути навіть кілька екземплярів), КФ будують для кожного пристрою кожного екземпляра комбінованого приладу. Такі індивідуальні КФ можуть мати різні константи апроксимаційних формул.

Для дослідно-конструкторських і градувальних робіт із новими приладами було використано кілька комплектів повномасштабних фізичних моделей гірських порід:

- моделі гірських порід різної густини, споруджені в ІГФ НАНУ (Бондаренко та ін., 2020);
- моделі пористих карбонатних пластів-колекторів на території «Київського заводу “Геофізприлад”» (Звольський та ін., 2008);
- універсальні моделі пористих карбонатних пластів-колекторів на базі ТОВ «Укрспецгеологія» (Бондаренко та ін., 2020);
- моделі Центра метрологічних досліджень «Урал-Гео», м. Уфа (Лобанков, 2016).

На *рисунку 3* для приладу LWD-КПРК-48 представлено градувальні характеристики пристрою 2ННК (а) і пристрою 2НГК (б) від пористості, пристрою 2ГГК (в) від густини та градувальні характеристики пристрою ГК (г) від загальної масової глинистості та масового вмісту глинистих мінералів.

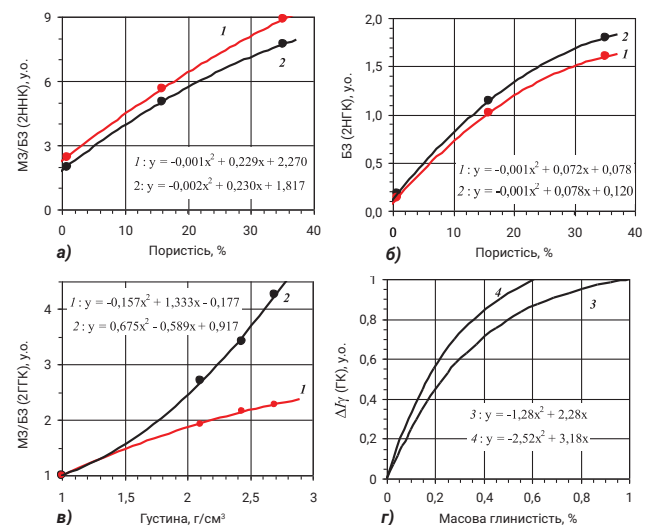


Рисунок 3. **Градувальні характеристики приладу LWD-КПРК-48**
Шифр кривих: 1 – $d_{\text{св}} = 156$ мм, $d_{\text{БТ}} = 121$ мм; 2 – $d_{\text{св}} = 124$ мм, $d_{\text{БТ}} = 99$ мм

- а) залежність показань зондів пристрою 2ННК від пористості;
- б) залежність показань більшого зонда пристрою 2НГК від пористості;
- в) залежність показань зондів пристрою 2ГГК від густини;
- г) відносний різницевий параметр ГК від загальної масової глинистості (3) і від масового вмісту глинистих мінералів (4).

Як видно з *рисунку 3*, прилад LWD-КПРК-48 характеризується достатньо високою чутливістю до петрофізичних параметрів (пористість, густина, глинистість) за наявності бурильних труб із зовнішнім діаметром 121 мм (товщина стінки 26 мм) і 99 (21) мм, які є типовими для буріння горизонтальних свердловин.

На *рисунку 4* для приладу WL-КПРК-42 представлено градувальні характеристики пристрою 2ННК

від пористості (а) і пристрою 2ГГК (б) від густини. З рисунка 4 видно, що чутливість приладу WL-КПРК-42 до пористості й густини є достатньою для їхнього визначення в умовах ОС, у тому числі за наявності НКТ.

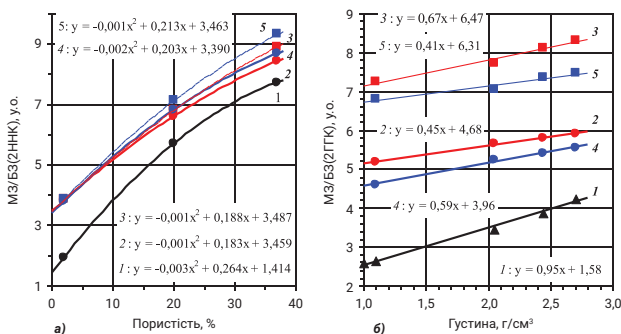


Рисунок 4. Градувальні характеристики приладу WL-КПРК-42

Шифр кривих: 1 – діаметр свердловини $d_{cb} = 216$ мм; 2 – $d_{cb} = 216$ мм, діаметр обсадної колони $d_{ок} = 146$ мм; 3 – $d_{cb} = 216$ мм, $d_{ок} = 146$ мм, діаметр насосно-компресорної труби $d_{нкт} = 73$ мм; 4 – $d_{cb} = 216$ мм, $d_{ок} = 168$ мм; 5 – $d_{cb} = 216$ мм, $d_{ок} = 168$ мм, $d_{нкт} = 73$ мм; а) відношення показань зондів пристрою 2ННК від пористості; б) відношення показань зондів пристрою 2ГГК від густини

ЕЛЕМЕНТИ ІНТЕРПРЕТАЦІЙНО-МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Для визначення петрофізичних параметрів газонасичених і нафтонасичених гірських порід за комплексом РК групою ядерної геофізики ІГФ НАНУ створено відповідні способи (Кулик та ін., 2006; Кулик та Бондаренко, 2010; Кулик та ін., 2014; Кулик та ін., 2015; Bondarenko and Kulyk, 2017), які є основою для розроблення інтерпретаційно-методичного забезпечення приладів LWD-КПРК-48 і WL-КПРК-42 з урахуванням умов проведення каротажу.

ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИНИСТОСТІ В ТЕРИГЕННИХ РОЗРІЗАХ НА ОСНОВІ ГК

Для отримання градувальних характеристик ГК загальну масову глинистість (вміст пелітової фракції (<0,01 мм)) C_{sh} (sh – від англ. shale) і масовий вміст глинистих мінералів C_{cl} (cl – від англ. clay) визначають за даними лабораторних досліджень. Між параметрами глинистості C_{sh} і C_{cl} та відносним різницею параметром гамма-каротажу ΔI_γ встановлено тісні кореляційні зв'язки, які є градувальними характеристиками ГК (див. рисунок 3г). Калібрувальними функціями ГК, за допомогою яких можна визначити C_{sh} і C_{cl} , є відповідні обернені функції градувальних характеристик:

$$C_{sh}^\gamma = 2,60\Delta I_\gamma^4 - 3,55\Delta I_\gamma^3 + 1,78\Delta I_\gamma^2 + 0,15\Delta I_\gamma, \quad (1)$$

$$C_{cl}^\gamma = 0,74\Delta I_\gamma^4 - 0,84\Delta I_\gamma^3 + 0,51\Delta I_\gamma^2 + 0,20\Delta I_\gamma. \quad (2)$$

Калібрувальні функції (1) – (2) в першу чергу справедливі для теригенних (піщано-глинистих) розрізів, незалежно від характеру насичення пластів. Функція (1) є близькою до відомої залежності Ларіонова (Кузнецов и Поляченко, 1990). Функція (2) – оригінальна залежність, отримана розробниками (Кулик та ін., 2015).

Крім параметрів C_{sh} і C_{cl} , для інтерпретації важливими є відповідні об'ємні параметри глинистості K_{sh} і K_{cl} . Їх визначають за комплексом ГК + один із методів визначення пористості (Кулик та ін., 2015).

Пористість за ГГК. Загальна пористість водонасичених колекторів за допомогою ГГК, K_{II}^γ , визначається як (Кузнецов и Поляченко, 1990):

$$K_{II}^\gamma = \frac{\delta_s - \delta_w^\gamma}{\delta_s - \delta_w}, \quad (3)$$

де δ_w^γ – густина породи, визначена за КФ для конкретного пристрою 2ГГК за заданих умов вимірювань;

КФ пристроїв 2ГГК приладів LWD-КПРК-48 і WL-КПРК-42 є оберненими до градувальних характеристик, представлених на рисунку 3в і рисунку 4б відповідно;

δ_s – густина твердої фази породи;
 δ_w – густина порової води.

Пористість за ННК+ГК. Пористість водонафтонасичених глинистих колекторів за комплексом ННК+ГК, $K_{II}^{nn+\gamma}$, визначають згідно з формулою:

$$K_{II}^{nn+\gamma} = \frac{K_{II}^{nn} - \omega_{cl} C_{cl}^\gamma}{1 - \omega_{cl} C_{cl}^\gamma}, \quad (4)$$

де C_{cl}^γ – масовий вміст глинистих мінералів за калібрувальною функцією ГК (2);

K_{II}^{nn} – «нейтронна» пористість, яку отримують за КФ для конкретного пристрою 2ННК за способом ННК за заданих літології і технічних умов вимірювань;

КФ пристроїв 2ННК приладів LWD-КПРК-48 і WL-КПРК-42 є оберненими до градувальних характеристик, представлених на рисунку 3а і рисунку 4а відповідно;

ω_{cl} – водневий індекс суміші глинистих мінералів за апріорними даними; для нафтогазових родовищ часто приймають усереднений водневий індекс для суміші основних глинистих мінералів (каолінит, хлорит, гідролюда, монтморилоніт) $\omega_{cl} \approx 0,2$.

ВИПРОБУВАННЯ СТВОРЕНИХ АПАРАТУРНО-МЕТОДИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

З приладом LWD-КПРК-48 та його інтерпретаційно-методичним забезпеченням виконано свердловинні випробування в процесі буріння на низці нафтогазових родовищ.

На рисунку 5 зображено приклад визначення петрофізичних параметрів під час буріння горизонтальної свердловини ($d_{cb} = 156$ мм, $d_{BT} = 120$ мм). У процесі

буріння в режимі реального часу визначено загальну масову глинистість за ГК, загальну густину породи за 2ГГК і пористість за 2ННК. За результатами повного набору даних із пам'яті приладу LWD-КПРК-48, свердловинний розріз розбито на інтервали й додатково визначено густину твердої фази порід за 2ННК+ГК+2ГГК, пористість за індивідуальними зондами 1ННК і 1НГК, оцінено літологію й характер насичення (за способом «1ННК+1НГК»).

З рисунку 5 видно, що дані ГК, 2ННК, 2ГГК і 2НГК приладу LWD-КПРК-48 взаємоузгоджені.

Для контролю результатів, отриманих LWD-КПРК-48 у процесі буріння, було виконано каротаж на трубах у відкритому стволі серійним приладом PEX фірми Schlumberger. З порівняння результатів LWD-КПРК-48 і PEX (рисунк 5 а, б, в) доходимо висновку, що глинистість, густина і пористість, які отримані приладом LWD-КПРК-48 у процесі буріння, загалом узгоджені з даними PEX, які отримані у відкритому стволі.

В окремих інтервалах (2360–2385 м, 2460–2475 м, 2530–2540 м, 2585–2610 м, 2655–2670 м) спостерігається заниження густини за даними LWD-КПРК-48 у порівнянні з даними PEX. Це пояснюється наявністю каверн у глинистих інтервалах, які впливають на центрований прилад LWD-КПРК-48 і практично не діють на прижимний пристрій 2ГГК приладу PEX.

ВИСНОВКИ

1. Створено апаратурно-методичні комплекси радіоактивного каротажу для визначення петрофізичних параметрів нафтогазових колекторів у процесі буріння і в обсаджених свердловинах з урахуванням свердловинних умов та специфіки досліджуваних геологічних об'єктів.

2. Розвинуто новий підхід до створення універсального малогабаритного комбінованого приладу радіоактивного каротажу для дослідження нафтогазових колекторів через суцільні бурильні труби в процесі буріння.
3. Виготовлено експериментальні зразки комбінованих приладів для каротажу в процесі буріння та в обсаджених свердловинах. Виконано дослідно-конструкторські, науково-дослідні й метрологічні роботи на повномасштабних фізичних моделях, отримано градувальні характеристики для типових геологічних і технічних умов проведення каротажу.
4. Створені апаратура і методики дають змогу визначати через сталеві труби основні петрофізичні параметри колекторів: глинистість, пористість, густину, характер насичення та ін.
5. Свердловинні випробування апаратурно-методичного комплексу для каротажу в процесі буріння засвідчили дієздатність і високу інформативність розробки, що підтверджено зіставленням із незалежними даними фірми Schlumberger.
6. Результати виконаних робіт свідчать про перспективність використання в Україні розроблених АМК для дослідження параметрів нафтогазових колекторів у процесі буріння і в обсаджених свердловинах. Важливим фактором є те, що українські розробники володіють необхідним набором ідей і ноу-хау та мають всі можливості для вдосконалення розробки і її подальшого серійного випуску.

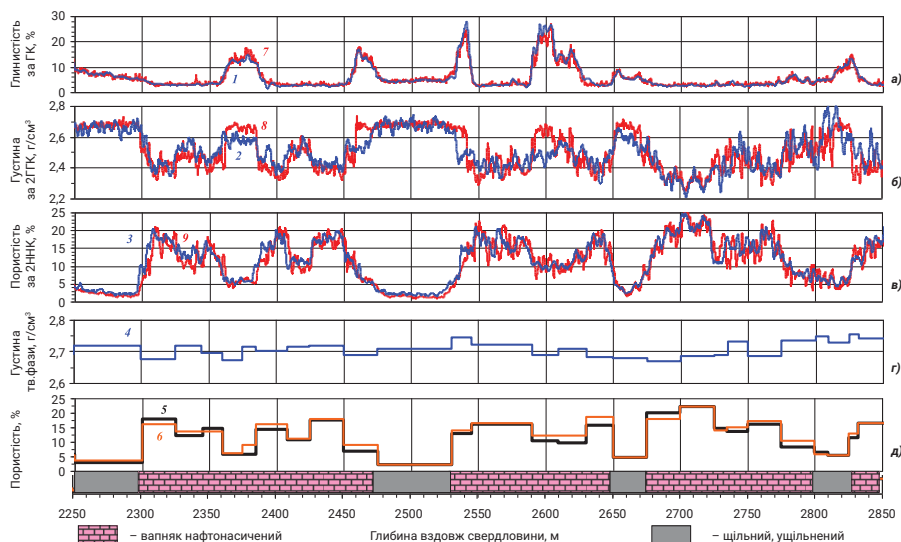


Рисунок 5. Результати каротажу в процесі буріння горизонтальної свердловини ($d_{cb} = 156$ мм, $d_{bt} = 120$ мм)

- а) загальна масова глинистість за ГК;
- б) загальна густина за 2ГГК;
- в) пористість за 2ННК;
- г) густина твердої фази;
- д) пористість за БЗ 2ННК (5) і МЗ 2ННК (6). Криві 1–6 – прилад LWD-КПРК-48, криві 7–9 – прилад PEX у відкритому стволі (Schlumberger)

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бондаренко М.С., Кулик В.В., Дмитренко О.В. Данилів С.М., Кармазенко В.В., Стасів О.С. Повномасштабні фізичні моделі гірських порід для калібрування приладів гамма-гамма каротажу за наявності сталеві труби. *Геофізичні дослідження та моделювання фізичних полів Землі*: матеріали V наук. конф. (Львів, 8–10 жовт. 2020 р.). Львів, 2020. С. 50–56.
- Данилів С.М., Кулик В.В., Бондаренко М.С., Дмитренко О.В. Лось М.В., Зіненко В.В. Модуль радіоактивного каротажу для дослідження нафтогазових колекторів в процесі буріння. Заявка на патент України на винахід № а202003302. Київ: ІГФ НАНУ, 2020.
- Звольський С.Т., Кулик В.В., Кармазенко В.В., Кетов А.Ю., Рибак В.І., Сніжко Ю.О. Спосіб виготовлення фізичних моделей пластів-колекторів, перетнутих свердловиною. Патент України на винахід № 84604. Київ: ІГФ НАНУ, 2008.
- Кузнецов О.Л., Поляченко А.Л. (ред.). Скважинная ядерная геофизика: справочник геофизика. 2-е изд. Москва: Недра, 1990.
- Кулик В.В., Бондаренко М.С. Спосіб визначення загальної пористості глинистих гірських порід в обсаджених і необсаджених свердловинах. Патент України на винахід № 90301. Київ: ІГФ НАНУ, 2010.
- Кулик В.В., Бондаренко М.С., Дейнеко С.І. Спосіб визначення параметрів глинистості гірських порід комплексом радіоактивного каротажу. Патент України на винахід № 109230. Київ: ІГФ НАНУ, 2015.
- Кулик В.В., Бондаренко М.С., Кармазенко В.В. Спосіб багатозондового нейтронного каротажу для визначення пористості і коефіцієнта нафтонасиченості колекторів та пристрій для його здійснення. Патент України на винахід № 74972. Київ: ІГФ НАНУ, 2006.
- Кулик В.В., Бондаренко М.С., Кривонос О.М. Спосіб визначення параметрів газоносних колекторів. Патент України на винахід № 106560. Київ: ІГФ НАНУ, 2014.
- Лобанков В.М. Метрологическое обеспечение в промышленной геофизике: учебное пособие. Уфа: УГНТУ, 2016.
- Модуль 2ННКт-LWD: руководство по эксплуатации. 2015. URL: <http://ukrspecpribor.com.ua>
- Прибор Луч-М-2014. 2014. URL: http://www.looch.ru/products/looch_m_2014.html
- Прибор 2ННК-ГГКлп-LWD-121. 2014. URL: <http://power-np.ru/2nnk-ggklp-lwd>
- Хаматдинов Р.Т., Еникеева Ф.Х., Велижанин В.А., Журавлев Б.К., Зотов А.Ф., Головацкий С.Ю., Жуков А.М., Гольдштейн Л.М., Семенов Е.В. Методические указания по проведению нейтронного и гамма-каротажа в нефтяных и газовых скважинах аппаратурой СРК и обработке результатов измерений. Калинин: Союзпромгеофизика, 1989.
- Allen D., Dergt D., Best D., Clark B., Falkoner I. Logging while drilling. *Oilfield review*. 1989. No 4. P. 4–17.
- Bondarenko M., Kulyk V. Determination of basic gas reservoir parameters from radioactive logging taking into account PT-conditions. *NAFTA-GAZ*. 2017. No 3. P. 11–17.
- Bonner S., Clark B., Holenka J., Voisin B., Dusang J. Logging While drilling: a three-year perspective. *Oilfield review*. 1992. No 7. P. 4–21.
- CHAT tool. 2019 <<https://geologsolutions.ca/chat-tool>>
- Ellis D., Luling M., Markley M. Cased-hole formation-density logging – some field experience. *SPWLA 45th Annual Logging Symposium*. 2004.
- Ellis D., Markley M. Measuring formation density through casing. US Patent №7292942B2. Schlumberger Tech. Corp., 2007.
- Ellis D., Singer J. Well Logging for Earth Scientists. 2nd ed. Dordrecht: Springer, 2008.
- Logging-While-Drilling Azimuthal Density Neutron Tool. 2003 <http://www.odplegacy.org/pdf/operations/engineering/logging_tools/lwd-adn.pdf>

REFERENCES

- Allen D., Dergt D., Best D., Clark B., Falkoner I. Logging while drilling. *Oilfield review*. 1989. No 4. P. 4–17 (in English).
- Bondarenko M., Kulyk V. Determination of basic gas reservoir parameters from radioactive logging taking into account PT-conditions. *NAFTA-GAZ*. 2017. No 3. P. 11–17 (in English).
- Bonner S., Clark B., Holenka J., Voisin B., Dusang J. Logging While drilling: a three-year perspective. *Oilfield review*. 1992. No 7. P. 4–21 (in English).
- CHAT tool. 2019 <<https://geologsolutions.ca/chat-tool/>> (accessed: 01.03.2021) (in English).
- Ellis D., Luling M., Markley M. Cased-hole formation-density logging – some field experience. *SPWLA 45th Annual Logging Symposium*. 2004 (in English).
- Ellis D., Markley M. Measuring formation density through casing. US Patent №7292942B2. Schlumberger Tech. Corp., 2007 (in English).
- Ellis D., Singer J. Well Logging for Earth Scientists. 2nd ed. Dordrecht: Springer, 2008 (in English).
- Logging-While-Drilling Azimuthal Density Neutron Tool. 2003 <http://www.odplegacy.org/pdf/operations/engineering/logging_tools/lwd-adn.pdf> (accessed: 01.03.2021) (in English).
- Bondarenko M.S., Kulyk V.V., Dmytrenko O.V. Danyliv S.M., Karmazenko V.V., Stasiv O.S. Povnomashtabni fizychni modeli hirsykykh porid dlia kalibruvannia prykladiv hamma-hamma karotazhu za naiavnosti stalevoi truby [Full-scale physical models of rocks for calibration of gamma-gamma logging devices in the presence of a steel pipe]. *Heofizychni doslidzhennia ta modeliuvannia fizychnykh poliv Zemli [Geophysical research and modeling of physical fields of the Earth]: materialy V nauk. konf. [materials of V sciences. conf.]* (Lviv, October 8–10, 2020). Lviv, 2020. P. 50–56. (in Ukrainian).
- Danyliv S.M., Kulyk V.V., Bondarenko M.S., Dmytrenko O.V. Los M.V., Zinenko V.V. Modul radioaktyvnoho karotazhu dlia doslidzhennia naftohazovykh kolektoriv v protsesi burinnia [Module of radioactive logging for the investigation of oil and gas reservoirs while drilling]. Zaiavka na patent Ukrainy na vynakhid [UA patent application for an invention] № a202003302. Kyiv: IHF NANU, 2020 (in Ukrainian).
- Hamatdinov R.T., Enikeeva F.H., Velizhanin V.A., Zhuravlev B.K., Zotov A.F., Golovackij S.Ju., Zhukov A.M., Gol'dshtejn L.M., Semenov E.V. Metodicheskie ukazaniya po provedeniju nejtronnogo i gamma-karotazha v neftjanyh i gazovyh skvazhinah apparaturoj SRK i obrabotke rezul'tatov izmerenij [Methodical instruction for neutron and gamma-ray logging in oil and gas wells with the SRK tool and processing of measured results]. Kalinin: Sojuzpromgeofizika, 1989 (in Russian).
- Kulyk V.V., Bondarenko M.S. Sposib vyznachennia zahalnoi porystosti hlynystykh hirsykykh porid v obsadzhenykh i neobsadzhenykh sverdlovynakh [The method for determination of total porosity of shaliness rocks in cased and open boreholes]. Patent Ukrainy na vynakhid [UA patent for invention] № 90301. Kyiv: IHF NANU, 2010 (in Ukrainian).
- Kulyk V.V., Bondarenko M.S., Deineko S.I. Sposib vyznachennia parametriv hlynystosti hirsykykh porid kompleksom radioaktyvnoho karotazhu [The method of determination of the parameters of the shaliness of rocks by a complex of radioactive logging]. Patent Ukrainy na vynakhid [UA patent for invention] № 109230. Kyiv: IHF NANU, 2015 (in Ukrainian).
- Kulyk V.V., Bondarenko M.S., Karmazenko V.V. Sposib bahatozondovoho nejtronnoho karotazhu dlia vyznachennia porystosti i koefitsienta naftonasyshchenosti kolektoriv ta prystrii dlia yoho zdiisnennia [The method of multispaced neutron logging for determination of porosity and coefficient of oil-saturation of reservoir and device for his realization]. Patent Ukrainy na vynakhid [UA patent for invention] № 74972. Kyiv: IHF NANU, 2006 (in Ukrainian).
- Kulyk V.V., Bondarenko M.S., Kryvonos O.M. Sposib vyznachennia parametriv hazonosnykh kolektoriv [The method for determination of parameters of gas reservoirs]. Patent Ukrainy na vynakhid [UA patent for invention] № 106560. Kyiv: IHF NANU, 2014 (in Ukrainian).
- Kuznecov O.L., Poljachenko A.L. (red.). Skvazhinnaja jadernaja geofizika [Downhole Nuclear Geophysics]: spravochnik geofizika [geophysics handbook]. 2-e izd. Moskva: Nedra, 1990 (in Russian).
- Lobankov V.M. Metrologicheskoe obespechenie v promyslovoj geofizike [Metrological provisions in well logging]: uchebnoe posobie [tutorial]. Ufa: UGNTU, 2016 (in Russian).
- Modul' [Module] 2NNKt-LWD: rukovodstvo po jekspluatatsii [operating manual]. 2015 <<http://ukrspecpribor.com.ua>> (accessed: 01.03.2021) (in Russian).
- Pribor [Tool] Luch-M-2014 <http://www.looch.ru/products/looch_m_2014.html> (accessed: 01.03.2021) (in Russian).
- Pribor [Tool] 2NNK-GGklp-LWD-121. 2014 <<http://power-np.ru/2nnk-ggklp-lwd>> (accessed: 01.03.2021) (in Russian).
- Zvol'skyi S.T., Kulyk V.V., Karmazenko V.V., Ketov A.Iu., Rybak V.I., Snizhko Yu.O. Sposib vyhotovlennia fizychnykh modelei plastiv-kolektoriv, peretnutykh sverdlovynoiu [Method of producing physical models of reservoirs crossed by a well]. Patent Ukrainy na vynakhid [UA patent for invention] № 84604. Kyiv: IHF NANU, 2008 (in Ukrainian).

APPARATUS-METHODICAL COMPLEXES TO DETERMINE PETROPHYSICAL PARAMETERS OF HYDROCARBON RESERVOIRS WHILE DRILLING AND IN CASED BOREHOLES

Serhiy
DANYLIV

director of LLC
«UkrSpecPribor»

The results of the development of apparatus-methodical complexes for the topical trends of geophysical borehole research, namely logging while drilling and wireline logging in cased boreholes, are presented. The complexes are based on the use of radioactive logging methods, which are effective in the presence of steel pipes in the borehole (integral gamma-ray logging, neutron-neutron logging, neutron-gamma logging and density logging).

Volodymyr
KARMAZENKO

engineer – geophysicist,
sole proprietor

Combined tools for logging while drilling (LWD-KPRK-48, diameter 48 mm) and wireline logging in cased wells (WL-KPRK-42, diameter 42 mm) have been developed.

The grading characteristics of the tools for typical logging conditions were obtained.

Oleg
STASIV

director of LLC
«UkrSpetsGeologija»

The main elements of interpreting-methodological support have been developed to determining the petrophysical parameters of oil and gas reservoirs: shaliness, density, porosity, type of saturation, etc.

The borehole tests have demonstrated high information capacity and efficiency of developed complexes.

Maksym
BONDARENKO

Candidate of Geological
Sciences, senior
researcher, Institute
of Geophysics
of NAS of Ukraine

Keywords: *logging while drilling; horizontal borehole; wireline logging; cased borehole; hydrocarbon reservoir; combined radioactive logging tool; interpreting-methodical support; petrophysical parameter.*

Volodymyr
KULYK

Candidate of Physical
and Mathematical
Sciences, senior
researcher,
leading researcher,
Institute
of Geophysics
of NAS of Ukraine