

НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ СВЕРДЛОВИН – КЛЮЧ ДО КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЄННЯ НАФТОГАЗОВИХ РОДОВИЩ

Богдан
ЛЕЛИК

кандидат геолого-
мінералогічних наук,
EurGeol 1312,
заступник директора
з технологічного
розвитку
ТОВ «ГЕО-ДЕЛЬТА-КБ»,
член Спілки геологів
України»

Валерій
СТЕЛЬМАХ

директор
«ГЕО-ДЕЛЬТА-КБ»,
член Спілки геологів
України

Здійснено докладний аналіз наявних методів радіоактивного каротажу для обрання найефективнішої технології з точки зору отримання достовірних даних фізичних величин, які характеризують матрицю пласта та флюїдонасичення у конкретний момент часу.

Мета роботи – дослідити наявність новітніх технологій радіоактивних геофізичних методів для оцінювання ресурсів нафтогазових родовищ, визначити напрями розв'язання практичних задач для освоєння свердловин, надати оцінку впровадження технології QUAD Neutron™ компанії Roke Technologies Ltd (Канада) у процесі реанімації старого фонду свердловин в Україні.

Проведено порівняльний аналіз використання провідними геофізичними компаніями імпульсних нейтронних методів, які широко застосовуються в Україні та світі, з технологією QUAD Neutron™ для визначення фільтраційно-ємнісних властивостей та характеру насичення пластів. Визначено критерії впливу на результати інтерпретації за наявності чи відсутності даних відкритого стовбура, діаметра досліджуваних свердловин, кількості обсадних колон, наявності чи відсутності цементу в заколонному просторі тощо. Показано переваги та недоліки кожної із систем для отримання правдивих даних. Наведено приклади ефективності отриманих результатів досліджень з рекомендаціями та результатами випробувань.

У процесі дослідження встановлено, що з 2009 року у світі проведено роботи за технологією QUAD Neutron™ у більше ніж 3000 свердловин. Географія застосування технології охоплює такі країни: Канада, США, Росія, Азербайджан, Малайзія, Колумбія, Венесуела, Перу, Китай, Нігерія, Мексика, Грузія, Таїланд, Казахстан та Саудівська Аравія. Дослідження з використанням цієї технології проводились на замовлення компаній: Shell, Лукойл, Petronas, Repsol, Cenovus, Talisman, Murphy, Роснефть.

З 2018 року обладнанням для застосування технології QUAD Neutron™ володіє компанія ТОВ «ГЕО-ДЕЛЬТА-КБ», яка є ексклюзивним представником компанії Roke Technologies Ltd в Україні. З цього часу на замовлення Укргазвидобування, Укрнафти та інших вітчизняних компаній у Західному та Східному регіонах було проведено дослідження з використанням технології QUAD Neutron™ у понад десять свердловин старого фонду з метою виявлення нафти та газу. Отримані результати інтерпретації матеріалів проведених досліджень в Україні свідчать про високу ефективність застосування технології, особливо у разі прийняття рішень щодо реанімації свердловин старого фонду.

Проведений аналіз наявних радіоактивних технологій дослідження нафтогазових свердловин дав можливість виокремити з їхнього масиву найефективнішу за отриманими показниками за рівних умов. Здобуті дані в результаті інтерпретації разом із розумінням процесів, що відбуваються у свердловинах, сприяють отриманню правдивої інформації та прийняттю виважених рішень. Найбільш ефективним призначенням технології QUAD Neutron™ є дослідження старого фонду свердловин зі складними конструкціями (до 4-х колон) для виявлення пропущених пластів, оцінювання потенціалу дієвих колекторів, визначення наявності чи відсутності цементу в заколонному просторі, зон обводнення тощо. Технологія також може бути успішно використана для оцінювання дієвих свердловин та у відкритих стовбурах свердловин, що буряться.

Ключові слова: технологія QUAD Neutron™; свердловина; нафта і газ; інтерпретація; фільтраційно-ємнісні властивості; пористість; насичення пластів; колектор.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Україна має багатотисячлітню історію нафтогазовидобування. Основними нафтогазоносними провінціями України сьогодні є Східний, Західний та Південний регіони. З початком буріння свердловин (Борислав, 1886 р.) було розпочато новий етап розвідки, відкриття та освоєння нафтогазоносних регіонів. За цей період пробурено десятки тисяч свердловин, відкрито сотні нафтових та газових родовищ.

На жаль, тривалий період виснажливої експлуатації родовищ, експорт сировини за кордон, застаріле обладнання та технології призвели до занепаду інфраструктури, що значно послабило позиції України у світі, перемістивши її в розряд енергозалежних. Проте колишню славу енергонезалежної держави ще можна та й потрібно відновлювати.

Значний ресурсний потенціал нафти та газу знаходиться у свердловинах старого фонду, яким з використанням ери нових технологій можна було б надати друге дихання, що дало б можливість стабілізувати процес падіння нафтогазовидобування та навіть у близькій перспективі наростити видобуток вуглеводнів за відносно незначних витрат на їхнє дослідження та повторний запуск в експлуатацію.

Як свідчить історія промислів нафтогазовидобування, не завжди обґрунтовано приймалися рішення щодо закриття свердловин або переведення їх на консервацію. Цьому сприяли, на наш погляд, кілька факторів, об'єднаних в одну проблему: подання керівництву для прийняття рішень не цілком правдивої та об'єктивної інформації, пов'язаної з різного роду аварійними станами свердловин, яку неможливо було перевірити у зв'язку з відсутністю на той час дієвих експрес-методів досліджень, браком технологічних можливостей для реанімації свердловин тощо.

Для проведення експрес-аналізу стану свердловин необхідні були каротажні прилади малого діаметра для роботи в бурових або насосно-компресорних трубах (НКТ), за допомогою яких за одну спускально-підіймальну операцію оперативно можна було б отримати комплексну оцінку ситуації у свердловині. До таких технологій експрес-досліджень у свердловинах належить метод QUAD Neutron™ (далі – QUAD).

Застосовувані досі методи геофізичних інтерпретацій геологічної ситуації, які повинні відбивати реальну оцінку ситуації за проведеними дослідженнями, не завжди дають можливість правильно визначити поточний стан перебування фронту обводнення свердловини, а використання даних відкритого стовбура кількарічної давності або інформації щодо сусідніх свердловин дуже часто суперечливі й не відповідають реальному стану розподілу рідин в незадвоєній частині пласта (Салімов та ін., 2014).

Такі недоліки, на жаль, характерні для всіх імпульсних методів нейтронного каротажу (ІНК), які широко застосовують сьогодні (далі у тексті під імпульсними методами матимемо на увазі всі наявні на даний момент модифікації геофізичних методів, які для створення поля швидких нейтронів використовують високочастотні

імпульсні генератори, такі як ІННК, ІНГК, ІНГК (С/О). Для того, щоб однозначно визначити характер насичення пластів-колекторів за даними ІНК, необхідно знати їхню пористість. У випадку, коли навіть пористість відома за даними відкритого стовбура або взята за аналогію із сусідніми свердловинами, на результати інтерпретації будуть мати вплив: наявність обсадної колони/колон, наявність чи відсутність цементу в заколонному просторі, зміна діаметра після проведених досліджень тощо.

Поєднання не поєднаних у часі характеристик у зв'язку зі специфічністю кожної свердловини призвело і призводить до надання неправильних висновків, що ґрунтуються на невідповідностях між вимірною пористістю та характером насичення продуктивних відкладів, а відтак дуже часто – до прийняття хибних рішень. Навіть за умови, що пористість визначатимуть за даними ІНК, знову виникатиме неоднозначність, спричинена тим, що нейтронні характеристики заповнювача порового простору невідомі.

НЕВИРІШЕНІ ПИТАННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Вирішенню проблем значною мірою сприятиме впровадження новітньої технології QUAD, яка передбачає проведення досліджень радіоактивними методами з використанням приладу малого діаметра, що дає можливість проводити дослідження як з допомогою бурового інструмента, так і через НКТ у свердловинах з наявністю до чотирьох металічних колон, та їхнє спеціальне оброблення та інтерпретацію шляхом застосування програмного забезпечення QUAD-QProc.

У результаті проведення досліджень є можливість отримати правдиву інформацію на час проведення дослідження щодо літологічного розчленування розрізу свердловини, ємнісних характеристик (пористості, диференціації розрізу за проникністю) та характеру насичення продуктивних відкладів, відносної густини порід, кількісного визначення глинистості порід, ступеня забруднення присвердловинної зони пласта буровим розчином та цементом, а також характеристику зони пошкодження в процесі перфорації, що сприятиме прийняттю виважених рішень стосовно подальших дій в освоєнні свердловини.

Мета дослідження – на основі детального аналізу фізичних особливостей петрофізичних даних свердловин та інтерпретаційних підходів до результатів, отриманих як із використанням ІНК, так і технології QUAD, викласти особливості та показати очевидні переваги сучасних технологій та інтерпретаційних підходів для отримання оригінальних характеристик з метою комплексного освоєння нафтогазових родовищ.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

У процесі дослідження здійснено аналіз десятків приладів радіоактивного каротажу, які наявні на світовому ринку й активно використовуються провідними геофізичними компаніями, у тому числі в Україні. Всіх їх можна поділити за джерелом активації нейтронів на дві категорії: імпульсні з генератором нейтронів та зі стаціонарним джерелом нейтронів.

Імпульсні прилади з генератором нейтронів, перші розробки яких відносять до 50-х років минулого століття (Зайченко, 2006), як свідчить проведений аналіз, мають цілу низку конструктивних та інтерпретаційних обмежень. Ключова відмінність, яка відрізняє інтерпретацію даних технології QUAD від параметрів, отриманих за допомогою ІНК, полягає в тому, що в QUAD використовується неоднозначність як за водневим індексом, так і за мінералізацією порового флюїду, як на полі теплових нейтронів нейтрон-нейтронного каротажу (ННК), так і на полі вторинного нейтронного гамма-випромінювання (НГК). Жодний імпульсний метод не поєднує ці дві фізичні основи вимірювання (використовується окремо або ННК, або НГК неоднозначність). Використання двох фізичних основ значно розширює динамічний діапазон вимірювання (Валуйський та ін., 2016).

Ще однією особливістю ІНК є проведення каротажу в режимі С/О (відношення енергетичних спектрів вуглецю та кисню). С/О каротаж забезпечує хороший результат під час визначення характеру насичення в умовах низької мінералізації пластової води. Однак через незначну глибинність досліджень, що обумовлено фізикою вимірювань, точність визначення параметрів обмежена радіальною глибинністю досліджень в 10–12 см ІНК. Багатофазність покладів також негативно впливає на цей вид каротажу, оскільки для газових покладів необхідна додаткова реєстрація параметрів, а це означає, що слід передбачити додатковий час, іншу статистику вимірювання та активацію зони дослідження. На противагу ІНК низька мінералізація пластових вод не створює ніяких обмежень для використання технології QUAD.

Для зменшення впливу ближньої зони (затримки до 600 мкс, а іноді й більше) на покази ІНК під час проведення досліджень використовують імпульсні генератори нейтронів з потужністю 14,4 МеВ, при цьому вплив ближньої зони залишається все-таки значним. У технології QUAD використовується потужне Am^{241}Be джерело швидких нейтронів з виходом нейтронів $22,2 \times 10^{10}$ Бк (6 Кюрі) з енергією 4,5 МеВ, яке мінімізує вплив ближньої зони, а також дає можливість використання технології в автономному режимі.

Достовірність отримання фізичних величин за допомогою технології QUAD досягається завдяки конструктивним особливостям приладу та створеній системі збирання та оброблення даних разом зі спеціально розробленим інтерпретаційним пакетом.

До складу свердловинного приладу QUAD входять чотири зонди, два з яких ННК, а два – НГК. Крім цього, до складу приладу входять датчики гамма-каротажу (ГК), фільтрованого гамма-каротажу (ФГК), локатора муфт (ЛМ), температури (Т) та резистивіметра (Р). Усі датчики, крім ЛМ, калібрують. Датчики радіоактивних методів перевіряють та узгоджують попарно на стадії виробництва. Узгоджені детектори нормалізують до стандартів фірми Roke Technologies Ltd, які створені в процесі проектування приладу QUAD.

Використання двозондового ННК та двозондового НГК нівелює вплив свердловинних умов (бурового

розчину, наявності кількох колон, незадовільного цементажу тощо) при визначенні підрахункових параметрів пластів-колекторів.

Однією з найбільш характерних особливостей технології QUAD є те, що в ній реалізовано використання спеціального корпусу свердловинного приладу. Завдяки цьому значно підвищується точність визначення глинистої компоненти гірських порід, що позитивно впливає на визначення фільтраційно-ємнісних властивостей (ФЄВ) досліджуваних колекторів, що, своєю чергою, призводить до того, що інформативність та достовірність результатів інтерпретації даних нейтронних методів з використанням технології QUAD успішно замінює комплекси геофізичних досліджень свердловин (ГДС), які проводяться у відкритих стовбурах свердловин. Це дає можливість отримати оригінальну інформацію навіть щодо свердловин, де взагалі відсутні або частково втрачені геолого-геофізичні дані, які були колись отримані в процесі буріння відкритого стовбура та проведення ГДС.

Єдиною умовою, яка обмежує використання цієї технології, є необхідність наявності рідини в інтервалі досліджень, крім випадків, коли дослідження проводять у газонаповнених свердловинах, які закінчені однією колоною, за умови, що в інтервалі дослідження частина інтервалу заповнена рідким флюїдом (для нормалізації параметрів у газонаповненому інтервалі), а також у свердловинах, які закінчені кількома сталевими колонами із заповненням стовбура свердловини газом, за умови наявності рідкого флюїду в колоні мінімального діаметра. В решті випадків заповнення стовбура свердловини газом необхідно використовувати поліпропіленові імітатори (кожухи) рідинного середовища, що пов'язано з використанням потужних джерел нейтронів.

Основні технічні характеристики приладу QUAD такі: довжина зібраного приладу становить 4,87 м (для автономної роботи – 6,00 м), вага – 38,6 кг, напруга живлення – 180 В, струм постійний – 42 мА, діаметр – 42,9 мм, максимальна робоча температура – 150 °С (тривалість – до 1 год), максимальний тиск – 1406 кг/см², мінімальний діаметр свердловини (труб) – 43,4 мм, постійне джерело нейтронів – Am^{241}Be , середня енергія нейтронів – 4,5 МеВ, глибина радіального дослідження – 91,4 см, використовуваний кабель – одножильний. Для роботи в автономному режимі можливе спускання приладу на НКТ, за допомогою трактора, сталюого дроту тощо.

Під час порівняння характеристик нейтронного приладу QUAD компанії Roke Technologies Ltd з подібними приладами малих діаметрів (43–63,5 мм) ІНК провідних геофізичних компаній світу, таких як: Schlumberger (прилади – RST та RST-pro), Halliburton (TMD3D та RMTelite), Weatherford (CRE та PND-S), BakerAtlas (RPM-C), Hunter (RAS), Hotwell (PNN), SDI(HPNN), за однакових умов глибина дослідження приладу QUAD становить 91 см (тоді як глибинність дослідження перелічених приладів становить до 19–36 см), що в рази перевищує наявні можливості досліджень приладами ІНК інших компаній. Порівняння можливостей досліджень QUAD та ІНК надано в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика можливостей QUAD та ІНК

Характеристики	RST, TDT, PDK, RPM, PNDS, RAS	PNN, MPNN	QUAD Neutron™
Джерело нейтронів	Імпульсний генератор	Імпульсний генератор	Стаціонарне джерело
Реєстрація γ -квантів	+	–	+
Реєстрація нейтронів	–	+	+
Чисті повтори ¹	–	+	+
Визначення глинистості	–	–	+
Індикатор проникності	–	–	+
Вимірювання пористості	–	–	+
Відносна густина	–	–	+
Пластові води низької мінералізації	+ ²	–	+
Диференціація: важка нафта/прісна вода	+ ²	–	+
Діаметр – 43 мм	+	+	+

¹ Чисті повтори – у випадку іонізації обсадної колони. В результаті опромінення швидкими нейтронами неможливо проводити повторні вимірювання з реєстрацією гамма-випромінювання.

² Тільки для С/О каротажу. Обмежене глибиною досліджень і пластовими параметрами.

За допомогою технології QUAD можна розв'язувати такі практичні задачі.

1. Визначення (уточнення) літології. Для розв'язання цих задач у технології QUAD реалізовано можливість отримання відносної густини гірських порід. Ця можливість ґрунтується на зв'язку між інтенсивністю поля гамма-квантів, які утворилися в результаті взаємодії теплових нейтронів з породою та густиною гірських порід, якими виповнений розріз свердловини. Теорія визначення відносної густини подібна до тієї, яка реалізована у приладах Neoscope фірми Schlumberger. Результати визначення відносної густини використовують для введення поправки на густину в криві флюїду (QL), побудови літологічної колонки, виділення газонасичених інтервалів.

2. Визначення ФЄВ та коефіцієнта пористості (K_p). Для інтерпретації даних використовують пористість, яка визначена на тих самих детекторах, що й характер насичення за однакових умов. В основу інтерпретації покладено використання двох фізичних основ вимірювання неоднозначностей як за водневим індексом, так і за мінералізацією порового флюїду, що є ключовою відмінністю QUAD від ІНК (докладно описано вище (Валуйський та ін., 2016).

Загалом, інтерпретація результатів досліджень проведених апаратурою QUAD ґрунтується на загальних методичних підходах, де визначення пористості зводиться до розв'язання рівняння виду:

$$K_p^H = K_p \cdot \omega_{зап} + K_{гЛ} \cdot \omega_{звв},$$

де K_p^H – уявна пористість, визначена за даними нейтронних методів; K_p – відкрита пористість;

$K_{гЛ}$ – об'ємна глинистість; $\omega_{зап}$ та $\omega_{звв}$ – вміст водню заповнювача порового простору та зв'язаної води в глинистому матеріалі, відповідно.

Зважаючи на те, що в основі методів нейтронного каротажу за тепловими нейтронами та нейтронного гамма-каротажу лежать відмінні фізичні принципи вимірювання пористості, флюїд, що заповнює поровий простір у навколо свердловинному просторі, буде по-різному впливати на покази відповідних методів. Тобто флюїд, який заповнює поровий простір, впливає на нейтрон-нейтронне та нейтрон-гамма поле неоднаково, спричиняючи неоднозначність розв'язання рівняння нейтронної пористості.

З огляду на зазначене можна дійти висновків, що похибка визначення пористості за ННК протилежна похибці під час визначення пористості за НГК для більшості заповнювачів порового простору. Відповідно, можливо знайти таку комбінацію між ННК та НГК, за якої на пористість, що розрахована на основі цих методів, вплив заповнювача порового простору буде мінімальний. Пористість, на яку вплив флюїду, що заповнює поровий простір, є мінімальним називають загальною пористістю, за даними технології QUAD, Quad Total Porosity (QTP).

Відповідно, наведене вище рівняння для технології QUAD буде представлено таким чином:

$$QTP = QEP + K_{гЛ} \cdot \omega_{звв},$$

де QTP – загальна пористість, визначена за даними нейтронних методів (ННК/НГК); QEP – відкрита пористість; $K_{гЛ}$ – об'ємна глинистість; $\omega_{звв}$ – вміст зв'язаної води в глинистому матеріалі.

У процесі адаптації методу було проведено численні експерименти порівняння значень пористості, отриманих за керновими даними, з пористістю, визначеною з використанням технології QUAD. Порівняння засвідчило практично повну збігаєність визначених показників із даними лабораторних досліджень, що підтверджує високу точність замірів приладом QUAD (Валуйський та ін., 2016).

Слід наголосити також на тому, що була та є недосконалість методичних підходів до інтерпретації, яка залежить як від кваліфікації фахівця з глибоким розумінням геологічних процесів, що відбуваються у свердловині, так і від якості отриманих геофізичних матеріалів. Стосується це не тільки старого фонду свердловин, у яких з різних причин не було проведено впевненого оцінювання коефіцієнта пористості, а й свердловин, які буряться

в теперішній час з використанням повного комплексу ГДС (Латишова та ін., 2007).

Для прикладу на *рисунку 1* наведено діаграму, де в інтервалі глибин 1864,0–1872,6 м, за даними повного комплексу ГДС, проведеного у відкритому стовбурі, виділявся глинистий пісковик з пористістю 18%, який за характером насичення був оцінений як ймовірно продуктивний. Перед переведенням свердловини в експлуатаційний режим з нижчезалеглих горизонтів на вищезалегли, представники надрокористувача вирішили провести додаткові дослідження з використанням технології QUAD. У результаті інтерпретації отриманих даних цей інтервал пісковика був охарактеризований як водонасичений з ефективною пористістю 6,4% (слід зазначити, що ця величина пористості нижча ніж граничні значення пористості,

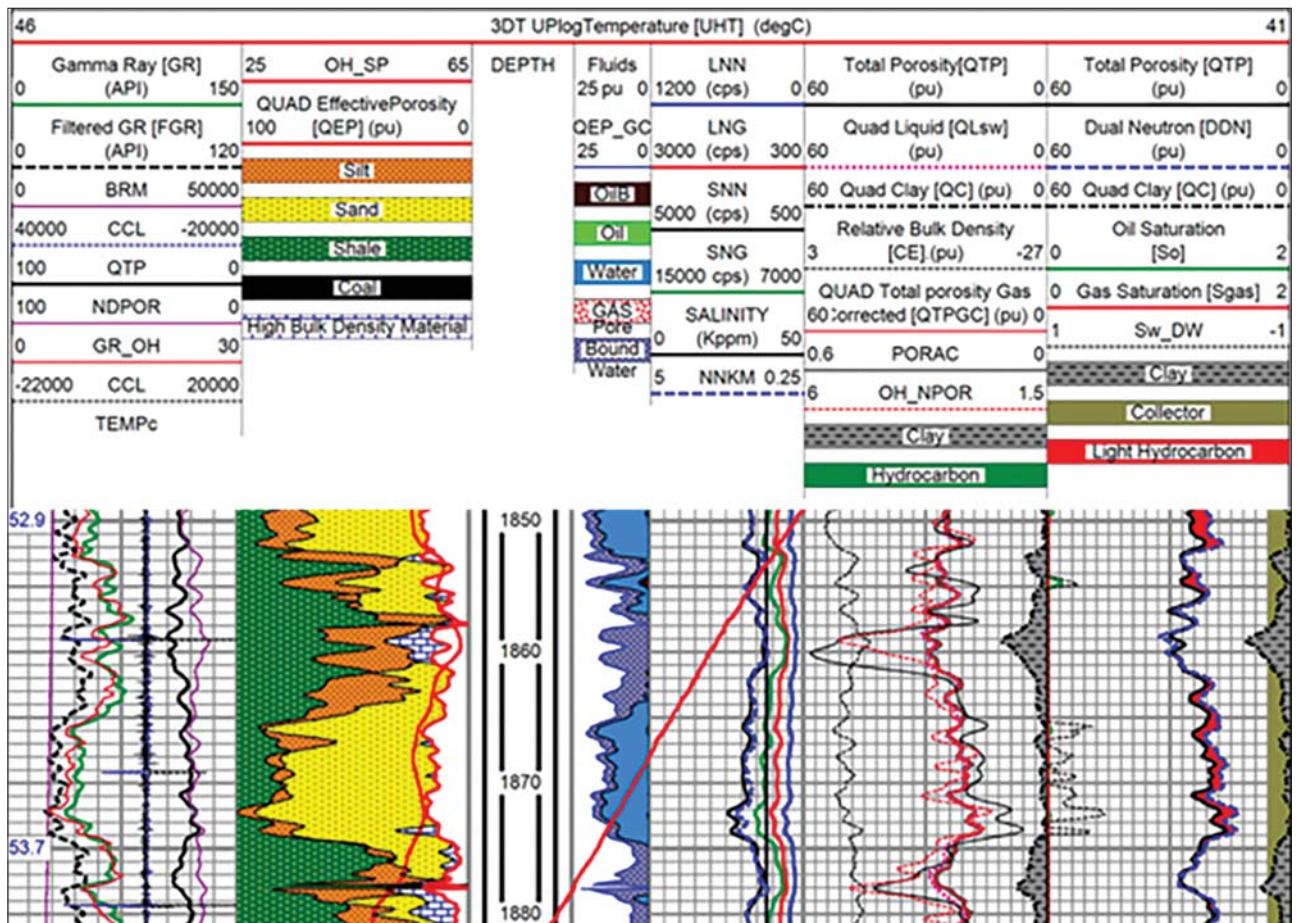


Рисунок 1. Фрагмент діаграми (Україна, 2019), отриманої в результаті застосування технології QUAD:

QTP (QUAD TotalPorosity) – крива загальної пористості (%); QC (QUAD Clay) – крива нейтронної глинистості, (ум. од.); CE (Chemical Effect) – крива хімічного ефекту (крива відносної густини) (ум. од.); QL (QUAD Liquid) – крива ефекту рідини (%); DDN (Dual Detector Neutron) – крива подвійного нейтронного каротажу (%); NDPOR (Porosity Normalized Relative Density) – нормалізована крива відносної густини (%); QEP_GC – скоригована за вмістом газу ефективна пористість (%); GR – крива ГК (API); FGR – крива відфільтрованого ГК (API); GR_OH – крива ГК відкритого стовбура (мкР/год); BBRM (UP) – крива резистивіметрії (запис на підймання) (ум. од.); CCL – крива локатора муфт (ум. од.); OH_SP – крива ПС відкритого стовбура (мВ); SILT – крива алевролітості (част. од.); SAND – крива піщаності (част. од.); SHALE – крива глини (част. од.); High Bulk Density Material – крива речовин із високою об’ємною густиною (част. од.); Depth – глибина (м); Fluids – об’єм пластових флюїдів у поровому просторі (%); OilB – крива зв’язаної нафти (%); Oil – крива нафти (%); GAS – крива газу (%); Bound Water – крива зв’язаної води (%); Oil Saturation – крива нафтонасиченості (част. од.); Gas Saturation – крива газонасиченості (част. од.); Temperature [UHT] – крива термометрії (°C); SW_DW – крива водонасиченості за моделлю подвійної води (част. од.).

прийняті для таких відкладів на родовищі). У результаті замовник робіт із недовірою поставився до нової інтерпретації, проігнорував дані, отримані з використанням технології QUAD, і, як наслідок, припливу флюїдів з пісковика одержано не було. Через вплив суб'єктивного фактору було даремно витрачено чималі матеріально-технічні ресурси на випробування та освоєння неперспективного інтервалу.

На рисунку 2 наведено приклад протилежного ставлення надрокористувача до даних досліджень. Було

прийнято рішення провести дослідження шляхом застосування технології QUAD у свердловині, яку ліквідували у 1987 році з причини обводнення верхнього горизонту. Свердловину було відновлено після ліквідації та підготовлено для проведення досліджень. За результатами інтерпретації отриманих даних, було рекомендовано два нижчезалегли горизонти як продуктивні. Після перфорації та освоєння приплив газу з цих горизонтів становив 26 000 м³/добу, що не потребує додаткових коментарів.

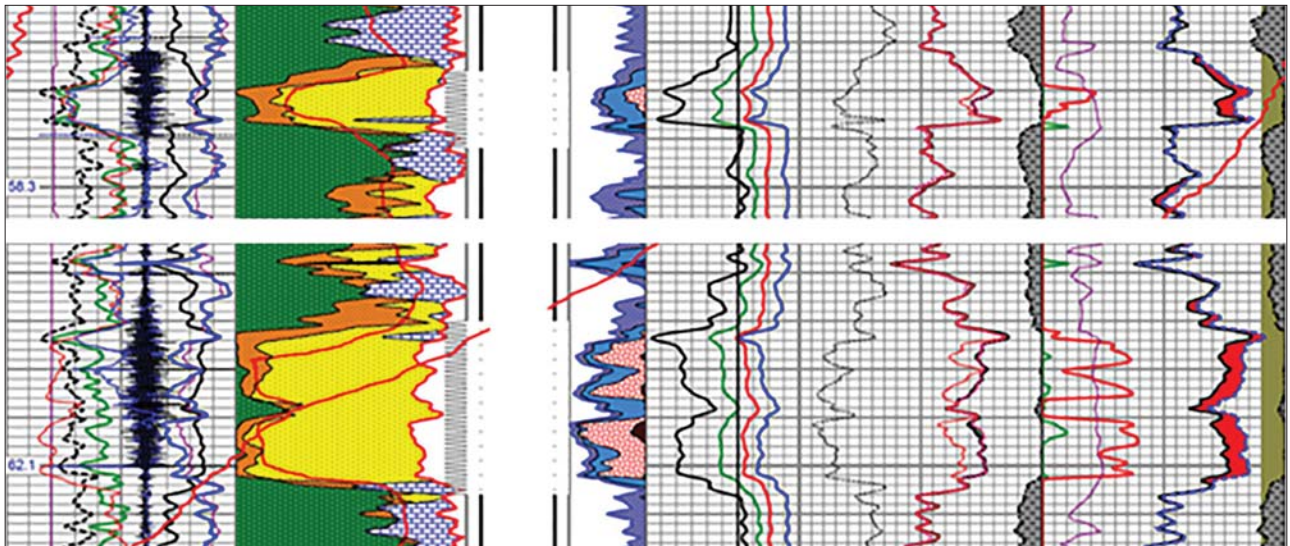


Рисунок 2

Фрагмент діаграми (Україна, 2019) щодо відновлення ліквідованої свердловини старого фонду. Після перфорації за результатами QUAD дебіт становив 26 000 м³/добу газу (умовні позначки кривих див. рис. 1)

3. Визначення якісної оцінки насичення колектора та коефіцієнтів нафтогазонасичення та мінералізації пластових вод. Природа цих визначень полягає у впливі флюїду на похибку обчислення пористості, описаній вище, а відтак ця особливість у фізичних принципах вимірювання створює передумови для визначення характеристик флюїдів, які заповнюють поровий простір породи-колектора.

Для розрахунку насичення використовують криву флюїду (QL), яка є комбінованою максимальною похибкою пористості методів ННК та НГК через вплив флюїду в поровому просторі. Тобто замість компенсації похибок визначення пористості проводять сумування похибок визначення пористості за впливом флюїдів у поровому просторі.

У випадку, якщо поровий простір заповнений прісною водою, – QTP = QL. У разі зростання мінералізації – QL > QTP, а за $\omega_{\text{зан}} < 1$ – QL < QTP.

Під час інтерпретації результатів каротажу проводять суміщення кривих QTP та QL в інтервалах з визначеною мінералізацією заповнювача порового простору. При цьому на каротажі будуть існувати інтервали, де QTP та QL збігаються. Інтервали, де крива QTP > QL, будуть насичені вуглеводнями або ж водою меншої мінералізації, ніж вода, в яких криві збігаються. Інтервали, де крива QTP < QL, будуть насичені

більш мінералізованою водою, ніж інтервали, де криві збігаються.

Розходження кривих QTP та QL можна використовувати для визначення насичення і розрахунку мінералізації пластової води. Порівнюючи криві QTP та QL, зміщується крива QL для її збігу з кривою QTP в точці з відповідною мінералізацією. Далі, знаючи властивості вуглеводнів, визначають максимальне розходження між кривими QTP та QL для 100% насичення вуглеводнями. Виміряні розходження порівнюють з максимальними (для 100% насичення). Отримана величина і буде становити кількість вуглеводнів у пласті, тобто насичення.

4. Оцінка забруднення (кольматації) присвердловинної зони колектора. Визначення ступеня забруднення полягає у виділенні зон за порівняннями $K_{\text{пл}}$ розрахованого за ГК та кривою нейтронної глинистості (QC). Криві збігаються в чистих пластах і характеризують вміст глинистої компоненти в глинистих інтервалах. Під час кольматації відбувається заміщення порового флюїду буровим розчином з домішкою глинистих частинок. Наявність зон кольматації (поглинання бурового розчину) не впливатиме на $K_{\text{пл_ГК}}$. При цьому $K_{\text{пл_QC}}$ буде завищений, оскільки на нього впливатиме заміщення порового простору глинистими частинками бурового розчину.

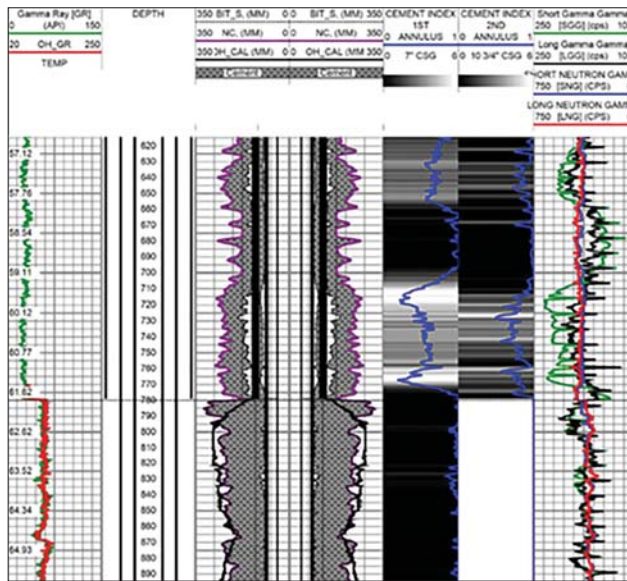


Рисунок 3

Діаграма (Малайзія, 2020) порівняння результатів якості цементажу обсадних колон, отриманих за даними радіального акустичного цементоміра, з даними технології QUAD (діаграма праворуч): GammaRay (GR) – крива ГК (API); OH-GR – крива ГК відкритого стовбура (API); BIT_S – крива номінального діаметра (мм); NC – крива нейтронного каверноміра (мм); OH_CAL – крива каверноміра відкритого стовбура (мм); SGG – ближній детектор гамма-гамма каротажу; LGG – дальній детектор гамма-гамма каротажу; SNG – ближній детектор нейтрон-гамма каротажу; LNG – дальній детектор нейтрон-гамма каротажу; Depth – глибина (м); Cementindex – якість цементування колон (част. од.); TEMP – показники термометрії (°C)

5. Відносна оцінка якості цементажу обсадних колон. Це оцінювання може виконуватися також у комплексі під час застосування технології QUAD. Методологія ґрунтується на різних глибинах дослідження навколо свердловинного простору із використанням різних джерел іонізуючого випромінювання.

На *рисунку 3* зображено приклад визначення якості цементажу обсадних колон, що проводився під час досліджень свердловини з використанням технології QUAD. Після проведення експериментів компонування НКТ було піднято та проведено дослідження з використанням радіального акустичного цементоміра (CBL). На діаграмному матеріалі можна помітити, що результати визначення цементного кільця з використанням технології QUAD доволі чітко корелюються з результатами акустичного цементоміра. І хоча визначення якості цементного кільця не є основною задачею, яка ставиться перед цією технологією, ця особливість дає змогу надкористувачу отримати додаткову інформацію про стан свердловини, не проводячи жодних маніпуляцій з внутрішньосвердловинним обладнанням (до речі, діаметри серійної апаратури акустичних цементомірів не завжди дають змогу провести такі дослідження через НКТ).

6. Оцінювання пластових (порових) тисків за даними поточного коефіцієнта нафтогазонасичення. Це оцінювання здійснюється за наступними критеріями. На

низький пластовий тиск газового покладу (за відсутності в пласті рідких вуглеводнів) буде вказувати розбіжність між QTP та нормалізованою кривою відносної густини (NDPOR), що пояснюється тим, що падіння нейтрон-нейтронної пористості, яка враховується як компонента в розрахунку QTP, не буде повністю компенсуватися падінням нейтрон-гамма пористості (другої компоненти в QTP), що призведе до зменшення величини QTP.

Величина розходження між QTP та NDPOR буде залежати від пластового тиску: що нижчий тиск газової складової, то більше розходження між кривими й нижче значення QTP буде реєструватися. Також на понижений пластовий тиск буде вказувати величина розходження QTP та QL. За відсутності рідких вуглеводнів і низького пластового тиску QL буде перевищувати QTP.

Основні переваги та відмінності результатів каротажу, отриманих з використанням технології QUAD:

- крива глинистості, отримана з використанням комплексної інтерпретації 2ННК, 2НГК та фільтрованого ГК, більш чутлива до наявності зони кольматції присвердловинної частини пласта в порівнянні з даними комплексу ГДС для відкритого стовбура;
- розрахунок насичення методом QUAD відбувається зі сторони нафти. Тобто розраховується вміст нафти, а все, що не нафта, то або газ, або вода. В інтерпретації даних відкритого стовбура інтерпретація ведеться зі сторони води, оскільки тільки вода проводить електричний струм. Відповідно, все, що не вода, то або нафта, або газ;
- насичення з використанням технології QUAD розраховується для об'ємного виміру, тоді як у відкритому стовбурі електричний струм поширюється шляхом найменшого опору. А для поправки на об'ємну модель вимірювань в рівняння насичення вводять додаткові коефіцієнти (K_{gr} , коефіцієнти a , m , n – в рівняннях Арчі – Дахнова), вплив яких переважно більший, ніж безпосередньо вимірюваний параметр опору пластової води (ρ_w);
- реєстрація даних QUAD в обсаджених свердловинах через бурову колону в автономному режимі чи безпосередньо на кабелі дає можливість отримувати дані про ФЄВ колекторів за алгоритмами, максимально наближеними до алгоритмів обробки даних відкритого стовбура, в умовах, коли проведення повного комплексу відкритого стовбуру технічно неможливе;
- технологія QUAD використовує чотири детектори, мінімізуючи вплив ближньої зони. Саме тому незадовільний цементаж, наявність кількох колон та складні свердловинні умови не є обмеженням для отримання достовірних даних.

**ВИСНОВКИ
ТА ПОДАЛЬШІ ПЕРСПЕКТИВИ**

На основі докладного аналізу фізичних особливостей свердловин та інтерпретаційних підходів до результатів, отриманих як із використанням ІНК, так і технології QUAD,

викладено особливості та показано очевидні переваги сучасних технологій та інтерпретаційних підходів для отримання оригінальних характеристик з метою комплексного освоєння нафтогазових родовищ.

Окрім цього, під час дослідження було зроблено такі висновки:

1. У близькій перспективі можливо стабілізувати видобування вуглеводнів в Україні та навіть наростити його шляхом впровадження новітніх технологій радіоактивного каротажу для проведення досліджень і визначення ресурсного потенціалу свердловин старого фонду за відносно незначних матеріальних витрат.

2. Провести дослідження у свердловинах старого фонду можливо тільки з використанням радіоактивних методів у зв'язку з конструктивними особливостями (телескопічна конструкція з металевими колонами, малі діаметри НКТ, наявність цементу тощо).

3. Імпульсні методи (з генератором нейтронів), як свідчить проведений аналіз, мають низку конструктивних та інтерпретаційних обмежень щодо радіальної глибини досліджень (19–36 см), визначення пористості, проникності, глинистості, відносної густини та інших показників, які є головними вихідними даними під час оцінювання ресурсного потенціалу та ефективної роботи свердловин. Параметри, які неможливо оцінити за даними ІНК, дослідники беруть з даних ГДС відкритого стовбура чи, за аналогією, із сусідніх свердловин, що є дуже приблизним, а часто, як свідчить досвід, зовсім не відповідає ситуації у свердловині на момент дослідження.

4. Сьогодні на ринку сервісних геофізичних послуг у світі вигідно вирізняється прилад зі стаціонарним джерелом нейтронів QUAD Neutron™, розроблений канадською компанією Roke Technologies Ltd. За останнє десятиліття з допомогою приладу було проведено дослідження більше ніж 3000 свердловин. Напрацьовано значний інтерпретаційний матеріал, отримано тисячі позитивних відгуків щодо реанімації та відновлення свердловин.

5. Технологія QUAD Neutron™ – це автономна геофізична система, що складається зі свердловинного приладу, системи збирання та оброблення даних, а також інтерпретаційного пакета. Технологія дає можливість проведення каротажу у свердловинах з використанням одножильного геофізичного кабелю, а також в автономному режимі під час спускання на НКТ, тракторі, сталюму дроті та ін., що робить її незамінною також під час досліджень у похило-спрямованих та горизонтальних свердловинах.

6. Технологія QUAD Neutron™ належить до унікальних геофізичних методів із значною радіальною глибиною

досліджень (до 92 см), що дає можливість за одне спускання-підймання у свердловині з наявністю до 4-х обсадних колон достовірно визначити такі параметри покладів, як: пористість; кількісну оцінку глинистості; величину нафтогазонасичення пласта; відносну густину та відносну проникність покладів; створити літологічну модель геологічного розрізу свердловини; оцінити ступінь забруднення (кольматації) присвердловинної зони пласта буровим розчином, цементом; виділити зони проведеної перфорації; оцінити якість цементування обсадних труб; визначити місця винесення піску тощо.

7. Обладнанням технології QUAD Neutron™ з 2018 року володіє ТОВ «ГЕО-ДЕЛЬТА-КБ», яка є ексклюзивним представником компанії Roke Technologies Ltd в Україні з 2017 року. В компанії працює висококваліфікований персонал зі значним досвідом роботи, здатний вирішувати геологічні та технологічні завдання будь-якої складності. Компанія пройшла повний цикл навчальних та атестаційних процедур, має ліцензії на використання та перевезення джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ), повірені прилади, діагностичне та калібрувальне обладнання.

8. З 2018 року фахівці компанії ТОВ «ГЕО-ДЕЛЬТА-КБ» провели понад десять успішних досліджень нафтових та газових свердловин старого фонду у Східному та Західному регіонах України. Висновки інтерпретації лягли в основу прийняття рішень надрокористувачами щодо виробування рекомендованих продуктивних горизонтів. Отримано першу продукцію.

9. Враховуючи факт, що технологія QUAD Neutron™ в Україні тільки впроваджується, з плином часу та збільшенням досвіду, який стосуються специфічних для кожного регіону особливостей геологічної будови родовищ, стану свердловин та інших характеристик, якість інтерпретаційного матеріалу тільки зростатиме.

10. Слід зауважити, що впровадження нової технології в Україні, як і очікувалось, проходить свій непростий шлях. Сервісні компанії, в тому числі й закордонні, володіючи імпульсними нейтронними методами, можуть працювати у свердловинах виключно за наявності даних відкритого стовбура. Технологія QUAD Neutron™ найкраще підходить для свердловин старого фонду з частково втраченою або повністю відсутньою геофізичною інформацією, що має особливу цінність і надає переваги.

11. Зважаючи на високу інформативність методу та достовірність отримуваних даних, підтверджених у тисячах свердловин світу, а також отримані позитивні результати апробації методу в Україні, впевнено можна стверджувати, що технологію QUAD Neutron™ слід впроваджувати на промисловій основі насамперед для комплексного розв'язання задач у свердловинах старого фонду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Валуйский К., Василина Р.М., Стельмах В.Г. Новые возможности геофизических методов при исследовании скважин через обсадную колонну и буровой инструмент. *Нефть и газ Украины*. Киев: Newfolk LLC., 2016. С. 60–67.

Зайченко В.Ю. Страницы истории отечественного приборостроения в области геофизических исследований скважин (1917–1991 гг.). Тверь: АИС, 2006. 248 с.

Латышова М.Г., Мартынов В.Г., Соколова Т.Ф. Практическое руководство по интерпретации ГИС: учебное пособие для вузов. М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. 327 с.

Салимов Ф.С., Плугин С.В., Крамер Г. Успешное применение новой технологии определения петрофизических свойств породы через обсадную колонну для увеличения нефтеотдачи в скважинах месторождения, находящегося на поздней стадии разработки. *Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче*. Москва, 14–16 октября 2014 года.

REFERENCES

Valujskij K., Vasilina R.M., Stel'mah V.G. Novye vozmozhnosti geofizicheskikh metodov pri issledovanii skvazhin cherez obsadnuju kolonnu i burovoj instrument [New possibilities of geophysical methods when investigating wells through casing and drilling tools]. *Neft' i gaz Ukrainy [Oil and gas of Ukraine]*. Kiev: Newfolk LLC., 2016. P. 60–67 (in Russian).

Zajchenko V.Ju. Stranicy istorii otechestvennogo priborostroenija v oblasti geofizicheskikh issledovanij skvazhin (1917–1991 gg.) [Pages of the history of domestic instrumentation in the field of well logging (1917–1991)]. Tver: AIS, 2006. 248 p. (in Russian).

Latyshova M.G., Martynov V.G., Sokolova T.F. Prakticheskoe rukovodstvo po interpretacii GIS: uchebnoe posobie dlja vuzov [A practical guide to the interpretation of GIS: a textbook for universities]. Moscow: Nedra-Biznescentr, 2007. 327 p. (in Russian).

Salimov F.S., Plugin S.V., Kramer G. Uspeshnoe primenenie novej tehnologii opredelenija petrofizicheskikh svojstv porody cherez obsadnuju kolonnu dlja uvelichenija nefteotdachi v skvazhinah mestorozhdenija, nahodjashhegosja na pozdnej stadii razrabotki [Successful application of a new technology for determining the petrophysical properties of rock through the casing for enhanced oil recovery in wells of a field at a late stage of development]. *Rossijskaja tehničeskaja neftegazovaja konferencija i vystavka SPE po razvedke i dobyče [SPE Russian Technical Oil & Gas Conference and Exhibition on Exploration and Production]*. Moscow, October 14–16, 2014 (in Russian).

NEW WELL RESEARCH TECHNOLOGY IS THE KEY TO THE INTEGRATED DEVELOPMENT OF OIL AND GAS FIELDS

Bogdan
LELYK

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, EurGeol 1312, deputy director of Technological development, «GEO-DELTA-KB» LLC, member of the UAG

Valerii
STELMAKH

director
«GEO-DELTA-KB» LLC,
member of the UAG

A detailed analysis of the available nuclear methods for well logging was carried out to select an effective technology from the point of view of obtaining true petrophysical data characterizing the formation matrix and fluid saturation at a specific point of time.

The goal of these process is research currently available nuclear technologies designed for the Oil and Gas field formation evaluation and to review results of the implementation of QUAD Neutron™ (product of Roke Technologies Ltd (Canada)) in old wells in Ukraine.

Reviewed are pulsed neutron technologies available from leading International Logging Companies, which are widely used in Ukraine, including the QUAD Neutron™, to determine primary petrophysical properties and the reservoir saturation characteristics. Certain criteria have been established that significantly impacted quality of the data analysis during interpretation. These included the number of casing strings installed, absence of Open Hole data as input, drill bit size, presence or absence of cement in the annulus and several others. The advantages and disadvantages of each of the systems are shown and effective examples of application with recommendations and test results are provided in this paper.

Since 2009 QUAD Neutron™ was successfully utilized in more than 3000 wells worldwide. The geography of technology application covers such countries as Canada, USA, Russia, Azerbaijan, Malaysia, Colombia, Venezuela, Peru, China, Nigeria, Mexico, Georgia, Thailand, Kazakhstan, and Saudi Arabia. The following list of IOC, NOC and other international E&P companies contains only some of the users of the data provided by QUAD Neutron™: Shell, Lukoil, Petronas, Repsol, Cenovus, Talisman, Murphy, Rosneft.

«GEO-DELTA-KB» LLC has exclusive rights to QUAD Neutron™ technology on the territory of Ukraine since 2018. Equipment has been used to provide valuable formation evaluation data to such clients as Ukrgasvydobuvannya, Ukrnafta and other domestic companies in the Western and Eastern regions. Data gave been acquired in dozens of old Oil and Gas wells. The obtained results demonstrate the high efficiency of the technology application, especially when making decisions for the reactivation of old wells.

Conducted analysis of existing nuclear logging methods allowed selection of the most effective technology as compared under similar conditions. The data obtained as a result of interpretation, together with an understanding of the processes occurring in the wells, contributed to providing reliable information for making informed decisions. The most effective application of the QUAD Neutron™ technology in Ukraine appears to be for the reevaluation of old wells with complex design (up to 4 strings of casing) to identify missing pay zones, assess the potential of existing reservoirs, determine the presence or absence of cement in the annulus, waterflooding zones, etc. The technology can also be successfully used for evaluating active wells and in openhole wellbores.

Keywords: QUAD Neutron™ technology; well; oil and gas; interpretation; reservoir properties; porosity; reservoir saturation; reservoir.