

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.04>

Олег ПЕТРОКУШИН, асп.

ORCID ID: 0000-0003-0953-2858

e-mail: olehpetrokushyn22@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Ірина БЕЗРОДНА, канд. геол. наук, доц., ст. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-6835-5276

e-mail: irynabezrodna@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ІМПУЛЬСНИЙ НЕЙТРОННИЙ КАРОТАЖ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ: ВИТОКИ, СТАНОВЛЕННЯ, СУЧАСНІСТЬ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф., О.М. Карпенком)

Вступ. Нині більшість нафтових і газових родовищ в Україні виснажені, що вимагає від операторських компаній в Україні постійного моніторингу рівнів насичення та руху флюїду в колекторах, оскільки це є важливою інформацією для оптимізації та планування подальших стратегій видобутку.

Метод. Відображено розвиток та сучасний стан імпульсного нейтронного каротажу як одного з основних методів контролю за розробкою нафтових і газових родовищ.

Результати. Акцентовано увагу на історії становлення ІНК починаючи з 1949 р. Подальший розвиток технології включає створення генераторів нейтронів, вдосконалення методик і апаратури, а також появу сучасних багатодетекторних приладів. Розглянуто два основні види ІНК: імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж (ІННК) і імпульсний нейтронний гамма-каротаж (ІНГК), кожен з яких має свої переваги і недоліки. Важливим етапом розвитку імпульсного нейтронного каротажу стало створення приладів *Sigma*-каротажу у 1960-х рр., які вимірюють поперечний перетин захоплення нейтронів і використовуються для оцінки нафтонасичення пластів. Значну увагу у статті приділено аналізу розвитку С/О-каротажу, що вперше застосований у 1971 р. і визначає відношення карбону до кисню для оцінки нафтонасичення порід. Розвиток багатодетекторних приладів дав змогу здійснювати дослідження через насосно-компресорні труби, що значно розширило можливості імпульсного нейтронного каротажу. Також представлено здобутки вітчизняних геофізиків з розвитку імпульсного нейтронного каротажу в Україні. Сучасні дослідження зосереджені на використанні багатодетекторних приладів і MCNP-моделей для кількісного визначення газонасиченості порід-колекторів. Використання цих приладів показало високу ефективність на родовищах Дніпровсько-Донецької западини та Передкарпатського прогину.

Висновки. Імпульсний нейтронний каротаж відіграє ключову роль у дослідженні та моніторингу обсаджених нафтогазових свердловин. Запропоновано подальші кроки для розвитку цієї технології в Україні, включаючи впровадження нових детекторів, збільшення кількості детекторів та використання MCNP-моделей для більш точного визначення насиченості пластів.

Ключові слова: імпульсний нейтронний каротаж, *Sigma*-каротаж, С/О-каротаж, MCNP-моделювання, багатодетекторні імпульсні нейтронні прилади.

Вступ

Здійснення раціональної розробки нафтогазових родовищ вимагає систематичного контролю, який забезпечується отриманням інформації в реальному часі про характер насичення пластів, відбір нафти, газу та заміщення їх водою в пластах, що експлуатуються як на окремих ділянках, так і на конкретному родовищі загалом. Одним з основних засобів контролю над розробкою нафтових і газових родовищ є геофізичні методи дослідження обсаджених свердловин і насамперед імпульсний нейтронний каротаж, який дає змогу визначати поточний характер насичення пластів.

Історія та хронологія застосування імпульсного нейтронного каротажу для дослідження нафтогазових свердловин нерозривно пов'язані з досягненнями у сфері ядерної фізики, появою нових вимірювальних систем, розвитком електроніки та обчислювальної мікропроцесорної техніки.

Першим кроком до становлення імпульсного нейтронного каротажу стало створення генератора нейтронів, який би міг використовуватися у свердловинних умовах. У 1949 р. Р. Ферон і Дж. Тейер подали заявку на патент на генератор, який прискорював ядра дейтерію на тритієву мішень або навпаки (Fearon, & Thayer, 1955). Оскільки попередні конструкції потребували наявності безперервного вакуумного насоса, який був непрактичним у свердловині, у 1952 р. А. Юманс подав заявку на патент на перший дейтерій-тритієвий генератор, який міг використовуватися у свердловині (Youmans, 1954). Варто зазначити, що у 50–60-х рр. XX ст. роботи зі

створення імпульсних генераторів нейтронів проводилися і в колишньому СРСР. Ці досягнення стали початком практичного застосування прискорювальних дейтерій-тритієвих імпульсних джерел нейтронів у дослідженнях нафтогазових свердловин.

Подальший розвиток методу імпульсного нейтронного каротажу йшов шляхом удосконалення методик і апаратури відповідно до завдань розвідки нафтогазових родовищ, підрахунку їх запасів і контролю над розробкою родовищ.

На сьогодні розрізняють два основні різновиди імпульсного нейтронного каротажу. Це імпульсний нейтронний каротаж з вимірюванням нестаціонарного імпульсно-періодичного поля теплових нейтронів – імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж (ІННК) та імпульсний нейтронний каротаж з вимірюванням нестаціонарних полів гамма-квантів радіаційного захоплення, непружного розсіювання або нейтронної активації – імпульсний нейтронний гамма-каротаж (ІНГК). За кордоном застосовували переважно модифікацію ІНГК, тоді як в Україні – модифікацію ІННК. Вважається, що ІНГК методично багатший, хоч його апаратура дорожча.

У даному огляді висвітлено історію розвитку, становлення та принципи сучасного застосування імпульсного нейтронного каротажу під час розробки нафтогазових родовищ у світі та в Україні.

Початок та здобутки імпульсного нейтронного каротажу у світі. *Sigma*-каротаж. Першим кроком у розвитку ІНГК у світі стало створення приладу,

який вимірював параметр Sigma (Σ) – поперечний перетин захоплення нейтронів. Вимірювання параметра Sigma було досягнуто шляхом підрахунку гамма-квантів як функції часу із синхронізацією з циклами ввімкнення-вимкнення імпульсного генератора нейтронів. Цей прилад, представлений у 1963 р. компанією Lane-Wells, отримав назву Neutron Lifetime Log (NLL) (Youmans et al., 1964).

До основних досягнень, які забезпечили створення приладу, що вимірював параметр Sigma, можна віднести включення генератора нейтронів у конструкцію приладу, початок використання кристалічних сцинтиляційних детекторів CsI(Na) і розробку високошвидкісної електроніки, яка була потрібна для синхронізації підрахунку гамма-квантів із циклами ввімкнення-вимкнення імпульсного генератора нейтронів. У приладі NLL генератор нейтронів працював на частоті 1000 Гц, водночас під час кожного імпульсу випромінювалося 100 000 нейтронів з енергією 14 МеВ із загальною швидкістю 108 нейтронів/с (Pemper, 2020).

Перший прилад NLL реєстрував лише кількість гамма-квантів за певні періоди часу – параметри GATE1 (від 400 до 600 мкс після імпульсу нейтронів) і GATE2 (від 700 до 900 мкс після імпульсу нейтронів). Пізніше додано розрахунок поперечного перетину захоплення нейтронів, параметр Sigma (Σ), оскільки його було легше інтерпретувати. Параметр Sigma розраховано з вимірів GATE1 (N_1) і GATE2 (N_2) за формулою

$$\Sigma = 35 \log \left(\frac{N_1}{N_2} \right).$$

На рис. 1 показано приклад каротажної діаграми, виконаної приладом NLL, де наведено порівняння кривих параметрів GATE1, GATE2 та Σ у комплексі з кривими самочинної поляризації (SP) та питомого електричного опору (RILD) (Fitz, 2023). З рисунка очевидно, що дуже низькі значення Σ і, відповідно, високі значення параметрів GATE1 та GATE2 вказують на інтервали колекторів вуглеводнів (ВВ). Дуже високі значення Σ і, відповідно, низькі значення параметрів GATE1 та GATE2 відповідають глинистим інтервалам. У свою чергу середні значення цих параметрів демонструють інтервали з високою пористістю, яка заповнена високомінералізованою водою.

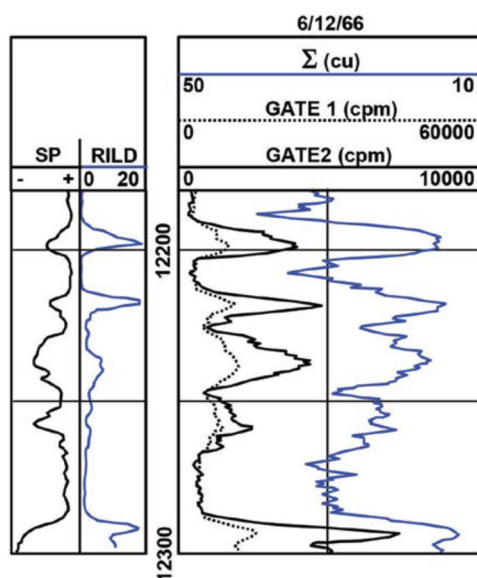


Рис. 1. Приклад каротажної діаграми приладом NLL (за Youmans et al., 1970)

Після розробки першого приладу Sigma-каротажу інші компанії нафтогазової галузі розробили схожі прилади: Thermal Neutron Decay Time (TDT) (Wahl et al., 1970), Thermal Multigate Decay (TMD) (Schultz et al., 1983; Smith et al., 1983a), Pulsed and Decay, 100 Channels (PDK-100) Tool (Randall et al., 1985; Randall et al., 1986) та Pulsed-Neutron Thermal Decay (PND) Tool (Odom et al., 1992) тощо.

Протягом наступних десятиліть відбулися значні вдосконалення приладів, які набагато спростили запис даних, підвищили чутливість приладів і точність інтерпретації даних. До них можна віднести: зменшення діаметру приладів, включення додаткових та більш чутливих сцинтиляційних детекторів (LaBr₃, BGO або YAP) в конструкцію приладів, вимірювання фонові Σ від свердловини та ін.

Одне з найновіших вимірювань параметра Σ було реалізовано за допомогою приладу Raptor (Weatherford) з чотирма детекторами, де четвертий (найвіддаленіший від генератора) детектор забезпечує вимірювання Σ без дифузії (Schmid et al., 2018).

Першочерговим завданням цих приладів є визначення коефіцієнта нафтонасичення порід за умов високої мінералізації пластових вод. У свою чергу основними обмеженнями вимірювання Σ є невеликий контраст значень між газонасиченими та нафтонасиченими пластами, низька мінералізація пластових вод та низька пористість колекторів, що значно ускладнюють інтерпретацію.

С/О-каротаж. Передумовою до становлення С/О-каротажу, першочерговим завданням якого було обчислення відношення вмістів карбону до оксигену для визначення нафтонасичення порід-колекторів, стало створення приладу спектрального гамма-каротажу (ГК). Основою для приладів спектрального ГК була нова технологія, яка дала змогу реєструвати енергію гамма-квантів.

Першим приладом спектрального ГК, який застосували в нафтогазових свердловинах у 1969 р., став Spectralog (Lock and Hoyer, 1971; Wichman et al., 1975). Аналогові імпульси надсилалися по каротажному кабелю на поверхню, де їх оцифровували, щоб можна було створити спектр енергії в діапазоні від 0 до 3.5 МеВ. На додаток до вимірювання інтенсивності загального (інтегрального) гамма-випромінювання, спектр використовувався для виділення кількості торію (Th^{232}), калію (K^{40}) і урану (U^{238}). Наступним кроком було калібрування інструменту, щоб перевести інтенсивності гамма-випромінювання в абсолютні кількості торію (ppm), калію (wt %) і урану (ppm). Енергетичні піки калію (1,461 МеВ), урану (1,765 МеВ) і торію (2,614 МеВ) були використані для стабілізації спектра як функції енергії. Калібрувальні зразки з відомою кількістю кожного елемента використовувалися як фундаментальна система калібрування для перетворення підрахунків гамма-випромінювання в концентрації цих елементів у пластах. Енергетичні "вікна", які використовувалися в аналізі, зображено на рис. 2 (Pemper, 2020).

Незважаючи на те, що при аналізі використовувалися лише три енергетичні "вікна", прилад Spectralog записував 256 каналів на кожному кроці вимірювань, у випадку, якщо вони будуть корисними. Як довела історія, це виявилось дуже корисним для майбутнього покоління імпульсних нейтронних приладів.

Поєднання імпульсного генератора нейтронів, нової електроніки та технології вимірювання енергії гамма-квантів в одному пристрої призвели до створення нового приладу імпульсного нейтронного каротажу – приладу С/О-каротажу. У 1971 р. Д. Арнольд, В. Шульц і Г. Сміт з Техасо (США) подали патент на систему імпульсного

нейтронного каротажу для вимірювання вмісту С, О, Са і Si (Arnold et al., 1973). Важливо відзначити, що у цьому методі у відношення вмісту С/О вводилася поправка за наявність неорганічного вуглецю в матриці породи (наприклад, вуглецю у матриці карбонатів) за допомогою вимірювання відношення вмісту Са/Si з спектра непружних розсіювань. Це стало дуже важливим рішенням, оскільки в породах може міститися більше вуглецю, ніж ВВ у пустотному просторі. Перший прилад С/О-каротажу

дав змогу проводити лише стаціонарні дослідження у свердловині з інтервалом спостереження від 1 до 10 хвилин. Пізніше, у 1976 р., оригінальний прилад удосконалили і вже проводили каротаж у режимі постійного запису (Wichman et al., 1976; Flynn et al., 1981; Hopkinson et al., 1981; Oliver et al., 1981). Саме для інтерпретації С/О-каротажу вперше було застосовано моделі Монте-Карло (MCNP-моделі) для врахування наявності нафти у свердловині.

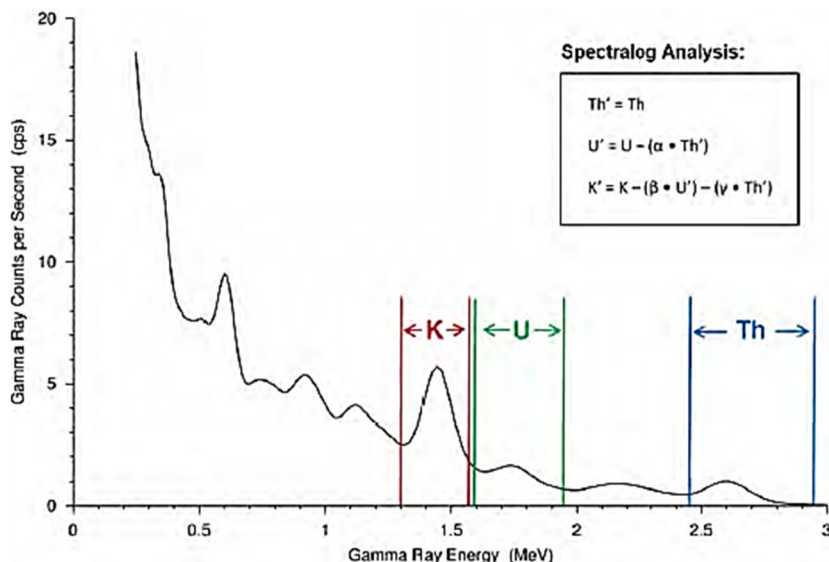


Рис. 2. Приклад методології, використаної приладом Spectralog для визначення спектральних компонентів природного гамма-випромінювання, які включали торій, калій і уран (Pemper, 2020)

У наступні десятиліття інші компанії нафтогазової галузі розробили свої прилади С/О-каротажу: Induced Gamma Ray Tool (IGT) (Hertzog, 1980), Gamma Ray Spectroscopy Tool (GST) (Westaway et al., 1983), Pulsed Spectral Gamma Ray Tool (PSG) (Jacobson et al., 1991; Wyatt et al., 1992). У цих приладах врахували недоліки першого приладу, зокрема покращили роздільну здатність спектра, автоматичне регулювання посилення детектора та відношення сигнал-завада, що в кінцевому результаті значно підвищило статистичну точність вимірів.

Головною перевагою С/О-каротажу є можливість визначати нафтонасичення у пластах, коли мінералізація пластових вод занизька для Sigma-каротажу за умови, що пористість пласта достатньо висока, а діаметр свердловини не надто великий.

Окрім відношення С/О, для визначення нафтонасичення інтерпретатори використовують відношення вмістів:

- Si/(Ca+Si) зі спектра непружних розсіювань для визначення літології;
- H/(Ca+Si) зі спектра захоплення нейтронів для визначення пористості;
- Fe/(Ca+Si) зі спектра захоплення нейтронів для визначення глинистості.

На рис. 3 показано приклад запису С/О-каротажу (Fitz, 2023) для моніторингу водонафтового контакту (ВНК). З рисунку очевидно, що моніторинговий запис відношення С/О порівняно з базовим записом чітко відображає рух ВНК у пластах C2-C4 та B2.

Роль MCNP-моделювання. Традиційно інтерпретація імпульсного нейтронного каротажу була лише якісною і полягала у визначенні глибини водонафтового контакту (ВНК), газонафтового контакту (ГНК), газоводяного контакту (ГВК) або визначенні інтервалів закачування газу чи води. Однак з часом у видобувних компаній виникла

потреба у точному визначенні зміни нафто- чи газонасичення порід. Ця точність була необхідною для економічної оцінки шансів на фінансовий успіх при застосуванні нових методів розробки пластів на родовищах. Така точність вимагала не лише каротажних вимірювань, але й відомостей про властивості пластів та флюїдів, а також вірно розроблених моделей реакції приладів для того, щоб точно обчислити насичення пластів. Саме для цього й почали використовувати математичний метод моделювання Монте-Карло (MCNP-моделювання).

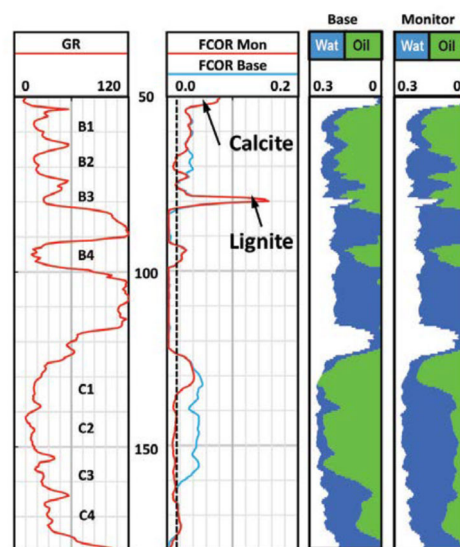


Рис. 3. Приклад запису С/О каротажу для моніторингу водонафтового контакту (ВНК) (Fitz, 2023)

Вперше метод Монте-Карло використав Енріко Фермі на початку 1930-х рр. для розрахунку властивостей переносу нейтронів. У 1950-х і 1960-х рр. XX ст. розроблено коди Монте-Карло для моделювання переносу нейтронів, гамма-квантів і фотонів (MCN, MCG і MCP). Ці коди були об'єднані в узагальнений код під назвою MCNP і вперше опубліковані у 1977 р. Цей об'єднаний код був кодом N-частинок загального призначення Монте-Карло, який можна було використовувати для моделювання переносу нейтронів, фотонів, електронів або зв'язаного переносу нейтронів/фотонів/електронів (Fitz, 2023). Першою використаною для геофізичних досліджень свердловин була версія 3 (1983 р.), а модифіковану версію 3A задокументували кількома роками пізніше (Briesmeister, 1987). У 1980-х і 1990-х рр. провели значний обсяг моделювання за методом Монте-Карло для відтворення ядерних процесів, пов'язаних із вимірюваннями, виконаними приладами імпульсного нейтронного каротажу. Хоч більшість моделювання проводили сервісні компанії, деякі видобувні компанії також його використовували.

Різні параметри пласта та свердловини впливають на нейтрони, що ускладнює інтерпретацію отриманих матеріалів. На перенос нейтронів впливають вміст свердловини, мінералогія пласта, пористість, пластові флюїди та глинистість. Зменшення впливу параметрів, не пов'язаних з газонасиченістю пласта, дуже важливе. Саме для врахування цих параметрів застосовують MCNP-моделі, які на сьогодні потрібні для точного визначення нафто- чи газонасичення пластів в обсаджених свердловинах.

MCNP-моделі використовують для прогнозування реакції кривої відношення значень на ближньому (БД) та дальньому детекторах (ДД), відношення відліків БД/ДД для непружного розсіювання нейтронів, так і для кривої БД/ДД для захоплення нейтронів. При цьому враховують різні свердловинні умови, такі як: розмір долота, розміри НКТ та обсадної колони, наявність/відсутність цементу, літологія пласта, властивості свердловинних флюїдів (щільність і мінералізація) і пластових флюїдів (щільність, мінералізація і склад газу).

На рис. 4 зображено MCNP-модель для імпульсно-нейтронного приладу CRE (Weatherford): (а) відношення відліків БД/ДД для непружного розсіювання та (б) відношення відліків БД/ДД для захоплення. Чорна крива відображає реакцію приладу у випадку 100%-го насичення пустот водою з мінералізацією 200 мг/л, червона крива – реакцію приладу у випадку 100%-го насичення пустот газом густиною 0,6 кг/м³.

Нове покоління багатодетекторних імпульсних нейтронних приладів. Після появи імпульсних нейтронних приладів Sigma та C/O-каротажу було зроблено спробу розробити версію цих приладів, які могли б проводити дослідження через насосно-компресорні труби (НКТ). Перший прилад малого діаметру, який мав змогу запису через НКТ, створено у 1991 р., через 28 років після першого приладу Sigma-каротажу і через 18 років після першого приладу C/O-каротажу. Проте це був один із головних проривів, який зробив революцію в галузі дослідження імпульсними нейтронними приладами. Сучасні моделі таких приладів продовжують удосконалюватися і сьогодні.

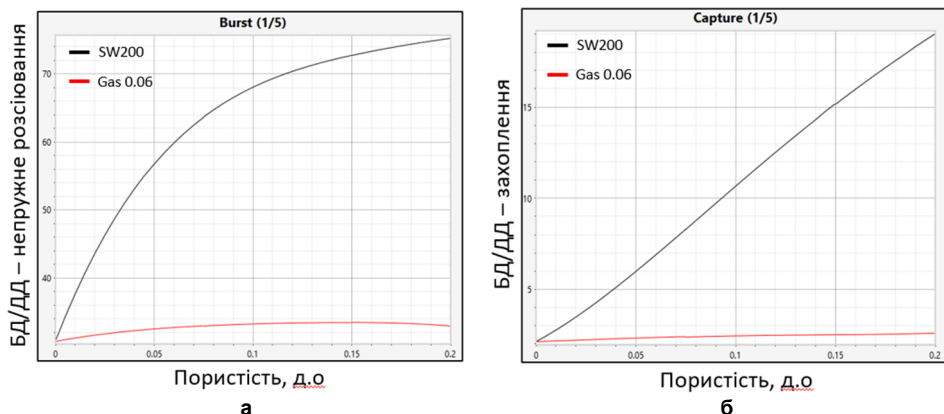


Рис. 4. MCNP-модель для імпульсно-нейтронного приладу Raptor (Weatherford): відношення відліків БД/ДД для непружного розсіювання (а); відношення відліків БД/ДД для захоплення (б)

Першим багатодетекторним приладом з малим діаметром був Reservoir Saturation Tool (RST), представлений у 1991 р. (Roscoe et al., 1991; Scott et al., 1991) і обладнаний двома сцинтиляційними детекторами GSO (оксиортофосфат гадолінію, легованого церієм). Використання цих кристалів забезпечувало більшу чутливість до реєстрації гамма-квантів, а отже, більшу статистичну точність вимірювань. Прилад RST міг працювати в режимі C/O- та Sigma-каротажу. Цей прилад також давав змогу проводити елементний аналіз порід.

Наступними багатодетекторними приладами, які почали застосовувати для дослідження обсаджених нафто-газових свердловин, були Reservoir Monitor Tool (RMT) (Jacobson et al., 1998) та Reservoir Performance Monitor (RPM) (Gilchrist et al., 1999; Mickael et al., 1999; Gilchrist et al., 2000). У 2008 р. створено прилад Cased-Reservoir Evaluation (CRE) (Odom et al., 2008), з того часу відомий як Raptor. Це був перший прилад у галузі, який

використовував новітню технологію сцинтиляційного детектора LaBr₃ (Menge et al., 2007), та детектор швидких нейтронів (Odom et al., 2002). Прилад CRE давав змогу записувати каротаж у трьох режимах: C/O, Sigma та детектування газу.

Найновішим приладом малого діаметра є Pulsed Neutron Extreme Tool (PNX) (Rose et al., 2015; Zhou et al., 2016). Цей прилад містить два сцинтиляційні детектори LaBr₃, один сцинтиляційний детектор YAP (ітрій-алюмінієвий перовскіт) і детектор швидких нейтронів. PNX давав змогу запису у режимах C/O, Sigma, детектування газу, а також вимірювання нейтронної пористості та проведення елементного аналізу порід.

На рис. 5 зображено основні сучасні багатодетекторні прилади імпульсного нейтронного каротажу. Використання нових подібних приладів дозволяє охопити більший об'єм нейтронно-гамма-транспортного поля та забезпечує більш високу чутливість вимірювання кількох

важливих властивостей пласта, зокрема й до виявлення газонасичених пластів з пористістю до 5 % (Zett et al., 2011). Детектори, розміщені на різних осевих відстанях від нейтронного генератора, дають змогу досліджувати пласт на різних глибинах. Масив із кількох спектроскопічних детекторів забезпечує гнучкість у змішуванні показів. Наприклад, можна використовувати детектори окремо для дослідження проникнення флюїдів у відкритих свердловинах, а також змішувати покази детекторів, щоб досліджувати пласт на різних глибинах (Gyllensten et al., 2009).

Застосування сучасних багатодетекторних приладів імпульсного нейтронного каротажу в поєднанні з MCNP-моделями для кількісного визначення газонасиченості

набувають дедалі більшого поширення при моніторингу газонасичення в обсаджених свердловинах.

На рис. 6 зображено зведений планшет свердловини A2 на газовому родовищі в межах Адріатичного моря (Bertoli et al., 2013). У пласті № 1 спостерігається знижене газонасичення порівняно зі значеннями насичення, отриманими за даними геофізичних досліджень свердловин (ГДС) у відкритому стовбурі. Інтерпретація комплексу імпульсного нейтронного каротажу дала змогу визначити залишкове газонасичення у пласті, що розробляється. У свою чергу у пласті № 2, який не розроблявся, газонасичення, визначене за допомогою імпульсного нейтронного каротажу, підтвердило рівень його високого значення за даними ГДС у відкритому стовбурі.

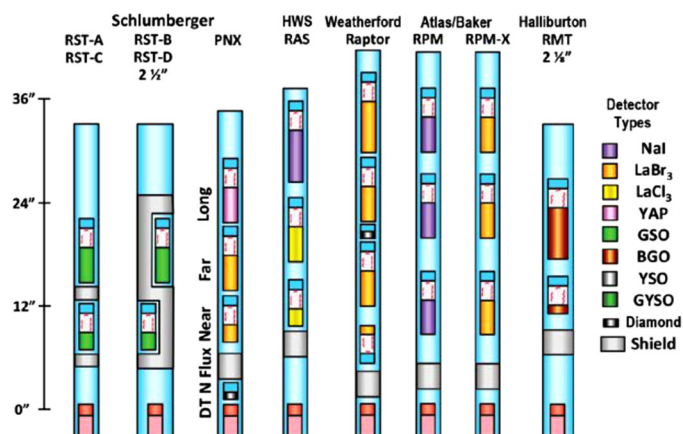


Рис. 5. Сучасні багатодетекторні прилади імпульсного нейтронного каротажу (Fitz, 2023)

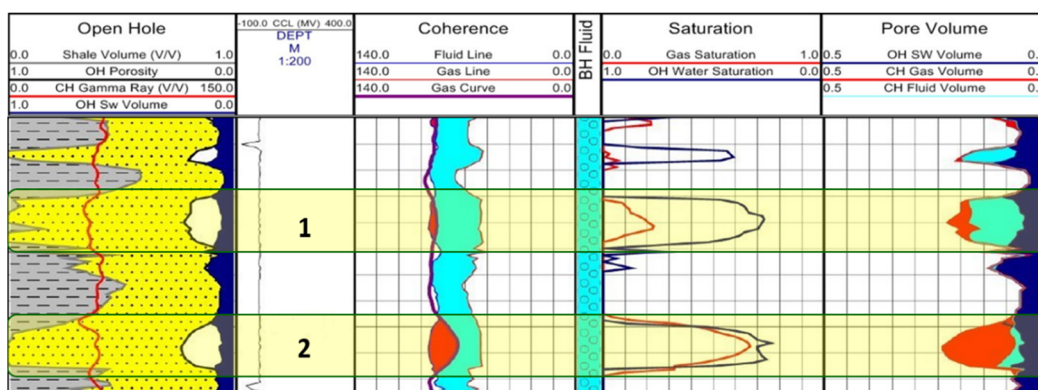


Рис. 6. Зведений планшет інтерпретації багатодетекторним приладом імпульсного нейтронного каротажу у свердловині A2 (Адріатичне море) (Bertoli et al., 2013)

Поточний стан досліджень у світі. Сучасне застосування багатодетекторних імпульсних нейтронних приладів дає змогу вирішувати такі завдання:

- кількісне визначення нафто-, газо- та водонасичення пластів;
- визначення фільтраційно-ємнісних властивостей та літології порід через обсадну колонну;
- оцінка глибини контакту між флюїдами;
- визначення типу ВВ;
- моніторинг видобутку ВВ;
- виявлення пропущених пластів-колекторів в обсаджених свердловинах;
- охарактеризування зон з пониженим пластовим тиском;
- прогнозування кривих ГДС за допомогою нейронних мереж;
- оцінка якості проведення гідророзриву пласта.

Окрім названих застосувань сучасних багатодетекторних імпульсних нейтронних приладів, їх використання в поєднанні з моделями MCNP, створеними під конкретні свердловинні умови, показали дуже якісні результати з визначення пористості та газонасичення у щільних породах різної літології. Таке поєднання показало успішні результати на родовищах у Північній Америці. Mekic N. et al. (2016) вдалося виділити газонасичені вапняки відкладів Union Valley та Viola (родовище на території штату Оклахома, США) із середньою пористістю 1,5–2,5 %. Також багато досліджень проведено і на родовищах, розташованих на території Скелястих гір, основними породами-колекторами яких є ущільнені глинисті пісковики із середньою пористістю 6–10 %. До прикладу, у роботі R. Ansara et al. (2009) дослідження були проведені у шести обсаджених свердловинах за допомогою приладу RPM у режимі GasView. Отримані результати з виділення газонасичених порід-колекторів показали стійку

кореляцію з результатами, отриманими при дослідженнях відкритого стовбура свердловин.

В останні десятиліття постійна еволюція ринку нетрадиційних порід-колекторів ставить нові виклики до розробки технологій для визначення властивостей сланцевих колекторів. Використання сучасних багатодетекторних приладів імпульсного нейтронного каротажу є одним із шляхів до визначення потенціалу сланцевих порід, особливо в горизонтальних свердловинах. Застосування цих приладів у обсаджених горизонтальних свердловинах значно зменшує ризики і економічні витрати на проведення каротажу. Наприклад, у 2019 р. за допомогою приладу CRE виконано каротаж у горизонтальній свердловині з метою детального дослідження сланців Barnett. Результати інтерпретації дали змогу виділити газонасичені інтервали, визначити пористість та літологію порід-колекторів (Advancements in Shale Reservoir Characterization Optimize Capital Expenditures, 2019).

Поточний стан досліджень в Україні. Імпульсний нейтронний гамма-каротаж в Україні використовують досить обмежено. Традиційно ІНГК застосовується у двох модифікаціях:

- імпульсний нейтронний гамма-метод з реєстрацією гамма-випромінювання радіаційного захоплення нейтронів (ІНГМ-РЗ) та
- імпульсний нейтронний γ -метод непружного розсіювання (ІНГМ-НР).

За допомогою ІНГМ-НР на сучасному етапі в Україні найчастіше визначають вміст у гірських породах чотирьох елементів: С, О, Si і Ca. С/О-каротаж – найпоширеніша модифікація ІНГК-НР. Практичний досвід робіт в Україні показує, що для кількісної інтерпретації даних С/О-каротажу потрібна опорна інформація у вигляді результатів ГДС відкритого стовбура і дані ІННК і СГК в обсадженому стовбурі (Вижва та ін., 2023).

Прилад ІНГМ-РЗ застосовують для визначення вмісту в гірських породах водню, хлору та заліза. При комплексуванні модифікацій ІНГМ-НР та ІНГМ-РЗ отримується значно більша інформація про досліджені гірські породи та флюїди, що їх насичують (Вижва та ін., 2012). За відношенням С/О оцінюють водо- або нафтонасиченість пластів-колекторів, а тип колектора визначається за допомогою відношення вмістів Si/Ca: малі його значення характерні для карбонатних порід, а підвищені – для піщано-глинистих відкладів. Також визначається залізистість гірської породи (відношення вмістів $Fe/(Ca+Si)$), дається оцінка пористості порід (відношення $H/(Ca+Si)$) та показника мінералізації підземних вод (відношення Cl/H).

Натомість найширшого використання на виробництві для дослідження обсаджених свердловин з метою визначення поточного значення насичення набув ІННК, який використовують в Україні починаючи з 1960-х рр. На сьогодні в країні для проведення ІННК застосовують спеціалізовану апаратуру типу ІГН-4 та інші сучасніші модифікації (МФНГ-341, 34; МФНГ-601, 60 та ін.). Ці прилади мають два або три зонди.

ІННК дає змогу проводити літологічне розчленування гірських порід і визначати їхні характеристики за основними нейтронними параметрами – середнім терміном життя нейтронів t і коефіцієнтом дифузії нейтронів D , останній тісно пов'язаний із пористістю породи. Досить позитивні результати отримано при використанні ІННК для визначення положення ВНК, пористості і нафтонасиченості порід-колекторів. Важливим завданням, яке успішно розв'язують шляхом застосування ІННК, є визначення ГНК та ГВК в пластах. Перехід від насиченої рідини до газонасиченої частини пласта супроводжується зниженням

густини породи і вмісту водню, що призводить до збільшення значень t і D .

Федоришин та ін. (2012) розглядали застосування методів математичної статистики в комплексі з ІННК для виділення продуктивних порід-колекторів на прикладі тонкошаруватих неогенових відкладів Летнянського газового родовища. Зокрема автори визначили, що асиметрія A та ексцес E швидкостей за даними імпульсного нейтрон-нейтронного (ІННК) та акустичного каротажу (АК) можуть бути інформативними для оцінки характеру флюїдонасиченості та піскуватості тонкошаруватих відкладів.

ІННК використовують і для визначення характеру насичення низькоомних колекторів. Ручко та ін. (2016) провели оптимізацію інтервалу часової затримки при реєстрації діаграм ІННК з метою більш однозначного розподілу пластів на нафто- і водонасичені; визначили нейтронні властивості порід (декремент затухання нейтронів у скелеті породи, воді та глині).

У роботі Кулінкович та ін. (2008) розглянуто випробування імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу в модифікації темпорального зондування на прикладі даних ГДС дослідження Матлахівського родовища. Автори отримали криву темпорального зондування, тобто криву зміни уявного декременту затухання від часу затримки, і застосували "метод трьох кривих". Цей метод передбачає обчислення для кожного значення глибини по осі свердловини осередненого значення декременту затухання для трьох інтервалів кривої темпорального зондування: для "ближньої" (затримки 5–11 С), "середньої" (затримки 12–18 С) і "дальної зони" (затримки 19–25 С). Використаний підхід дає змогу визначити або уточнити характер насичення порід-колекторів та кількісно оцінити коефіцієнт нафто- або газонасичення, проводити моніторинг видобутку ВВ та виявляти ВНК або ГВК та контролювати їх зміну. Варто відзначити, що для отримання коректних результатів кількісної інтерпретації за даною методикою необхідною процедурою є "налаштування" нейтронних петрофізичних моделей, що вимагає наявності даних ГДС у відкритому стовбурі, зокрема і попередньо визначених коефіцієнтів глинистості, пористості, відносної нафто- та газонасиченості.

До основних недоліків розглянутих підходів для визначення насичення порід-колекторів за вітчизняними імпульсними нейтронними-нейтронними методами належать використання моделей, що допускають однорідність нейтронних властивостей скелета породи водонасиченої і нафтонасиченої частини пласта; потреба наявності результатів ГДС у відкритому стовбурі, даних по реперних пластах із відомим максимальним та мінімальним значеннями насичення та ін. Невиконання цих умов значно збільшує похибку визначення поточного насичення пласта. Крім того, залишається нерозв'язаною проблема врахування свердловинних умов, літологічного складу порід, типу та складу флюїду у пустотному просторі, що впливатимуть на поширення нейтронів у свердловину та пласт, і подальшу їх реєстрацію приладами.

В останні десятиліття видобувні компанії в Україні на родовищах Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) та Передкарпатського прогину почали використовувати сучасні багатодетекторні імпульсні нейтронні прилади, які пропонують зарубіжні сервісні компанії. У роботі С. Cavalleri et al. (2021) представлено результати дослідження приладом PNХ у свердловині Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину. Традиційно газові породи-колектори Міоцену цієї зони становлять великі труднощі при інтерпретації даних ГДС через свою тонкошаруватість та високу глинистість. Автори показали, що з використанням

приладу FNХ вдалося детально визначити мінералогію порід, а визначення параметра FNХS та Sigma з високою роздільною здатністю дали змогу точно виділити інтервали газонасичених пісковиків.

Використання сучасних багатодетекторних імпульсних нейтронних приладів на родовищах ДДЗ також показало дуже хороші результати. До прикладу, у роботі (Iuras et al., 2021) представлено результати дослідження приладом PNХ у трьох свердловинах різних родовищ. У свердловинах А і В, які були похилоскерованими, не вдалося здійснити запис ГДС у відкритому стовбурі у зв'язку з високими геологічними ризиками, натомість було здійснено дослідження приладом PNХ в обсаджених свердловинах, за допомогою якого вдалося отримати детальну літологію, ефективну пористість та кількісно визначити газонасиченість пісковиків. У випадку свердловини С дослідження проведено в інтервалі, який був представлений сланцями з підвищеним вмістом органіки та карбонатними породами. У результаті автори отримали детальну літологію, коефіцієнти ефективної пористості і газонасиченості вапняків, а також визначили параметр TOC (total organic carbon) в органогенних сланцях.

За допомогою приладу CRE було проведено дослідження у трьох свердловинах одного з найбільших родовищ України, яке розташовано у приосьовій зоні південно-західної частини ДДЗ (О. Petrukushyn et al., 2024). Основна мета цієї роботи полягала в двох аспектах: визначити поточний коефіцієнт газонасичення в пісковиках та оцінити рівень виснаження цих пластів; знайти та оцінити потенційні породи-колектори в інтервалі евапоритів. Особливу складність у даному дослідженні становила майже повна відсутність даних ГДС у відкритому стовбурі, оскільки свердловини були пробурені ще у 1960-х рр. Результати оцінки газонасичення показали, що залишкове насичення газом лежить у діапазоні 35–40 %. Цей результат підтверджений даними з видобутку, які показали, що пласти досягли 90 % від свого потенціалу. В інтервалі евапоритів виділено породи-колектори із середньою пористістю 8–15 % та коефіцієнтом газонасичення 30–50 %. Окрім того, за допомогою активації кисню вдалося визначити інтервали притоку пластової води у фільтрових частинах трьох свердловин.

Дискусія і висновки

Імпульсний нейтронний каротаж відігравав і продовжує відігравати значну роль у дослідженні та моніторингу обсаджених нафтогазових свердловин. До початку 1990-х рр. доводилося використовувати два різних типи приладів, щоб виконати Sigma- та C/O-каротаж. Це змінилося з появою перших багатодетекторних приладів імпульсного нейтронного каротажу. На сьогодні сучасні прилади дають змогу здійснювати не лише Sigma- та C/O-каротаж за допомогою одного приладу, але й отримати відношення відліків на ближньому та дальньому детекторах для непружного розсіювання та захоплення нейтронів, за допомогою яких можна кількісно оцінити газонасичення порід, фільтраційно-ємнісні властивості порід-колекторів та детальну літологію.

Що стосується України, то нам належить пройти великий шлях з удосконалення вітчизняних приладів імпульсного нейтронного каротажу, необхідними кроками якого є впровадження сучасних апаратних рішень. До прикладу, використання нових і більш чутливих сцинтиляційних детекторів гамма-квантів та збільшення кількості детекторів, що підвищить глибину дослідження приладів. Основним та, мабуть, найголовнішим запровадженням має стати використання при інтерпретації результатів проведення каротажу MCNP-моделей, які

будуть враховувати конкретні свердловинні умови, літологічний склад порід, тип та склад флюїду в пустотному просторі. Це дасть змогу набагато точніше кількісно визначати коефіцієнт нафто- чи газонасичення порід.

Внесок авторів: Ірина Безродна – написання (перегляд і редагування); Олег Петрокушин – концептуалізація, написання (оригінальна чернетка).

Список використаних джерел

- Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., & Шабатура, О. В. (2023). *Ядерно-геофізичні методи дослідження свердловин*. ВПЦ "Київський університет".
- Вижва, С. А., Онищук, І. І., & Черняев, О. П. (2012). *Ядерна геофізика*. ВПЦ "Київський університет".
- Кулінкович, А. Є., Косаченко, В. Д., & Ліннік, К. В. (2008). Випробування методу імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу в модифікації темпорального зондування в комп'ютерній технології "Геополук" на матеріалі нафтогазових свердловин Дніпровсько-Донецької западини. *Геоінформатика*, (4).
- Ручко, В. О., & Ручко, К. О. (2016). Визначення характеру насичення низькоємних колекторів за даними імпульсного нейтрон-нейтронного методу. *Мінеральні ресурси України*, (2).
- Федоришин, Д. Д., & Пятковська, І. О. (2012). Комплексна інтерпретація результатів імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу та параметрів математичної статистики для підвищення видобутку газу із порід-колекторів тонкошаруватих неогенових відкладів. *Нафтогазова енергетика*, (2).
- Advancements in shale reservoir characterization optimize capital expenditures. (2019). <https://www.worldoil.com/magazine/2019/march-2019/features/advancements-in-shale-reservoir-characterization-optimize-capital-expenditures/>
- Ansari, R., Mekic, N., Chace, D., Rust, M., & Starr, M. (2009). Field Applications Of A New Cased Hole Gas Saturation Measurement In Tight Gas Reservoirs. In *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*. The Woodlands, Texas.
- Arnold, D. M., Schultz, W. E., & Smith, H. D., Jr. (1973). *Pulsed Neutron Logging System* (US Patent No. 3,780,302).
- Bertoli, S., Borghi, M., Galli, G., Oprea, A., & Riley, S. (2013). Field Trials of a new Array Pulsed Neutron Formation Gas Measurement in Complex Completions. In *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*. Ravenna, Italy.
- Briesmeister, J. F. (1987). *MCNP—A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport, Version 3A*. National Technical Information Service, US Department of Commerce. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/044/18044302.pdf
- Cavalleri, C., Akashev, Y., Ahmad, S., Yuras, S., Karpyn, V., & Abdelatif, I. (2021). Advanced Formation Evaluation Approaches in Complex Low-Resistivity Thin Shale Laminations: Success Case Histories from Western Ukraine. <https://doi.org/10.2118/208513-ms>
- Fearon, R. E., & Thayer, J. M. (1955). *Method for Neutron Well Logging* (US Patent No. 2,712,081).
- Fitz, D. E. (2023). Evolution of Casedhole Nuclear Surveillance Logging Through Time. *Petrophysics*, 64(4), 473–501. <https://doi.org/10.30632/pjv64n4-2023a1>
- Flynn, J., Conley, S., Frost, E., & Fertl, W. H. (1981). *Cased Hole Exploration and Recompletions in West Texas Based on the Continuous Carbon/Oxygen (C/O) Log*. <https://doi.org/10.2118/9714-ms>
- Gilchrist, W. A., Pemper, R. R., Trcka, D., Frost, E., Jr., & Wilson, W. (2000). Initial Field Applications of a New 1.7-Inch Pulsed Neutron Instrument. In *SPWLA 41st Annual Logging Symposium*. Dallas, Texas, USA.
- Gilchrist, W. A., Prati, E. J., Pemper, R., Mickael, M., & Trcka, D. (1999). Introduction of a new through-tubing multifunction pulsed neutron instrument. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1999*(SPE 56803), 1–10. <https://doi.org/10.2118/56803-ms>
- Gyllenstein, A., Al-Arifi, S., Al Hammadi, M., Al Marzouqi, K., Madjidi, A., Mauborgne, M. L., & Weller, G. (2009). Advances in LWD sigma measurements and application to real-time formation evaluation in carbonate reservoirs. *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*, Paper M.
- Hertzog, R. C. (1980). Laboratory and field evaluation of an inelastic neutron scattering and capture gamma ray spectrometry tool. *SPE Journal*, 20(05), 327–340. <https://doi.org/10.2118/7430-pa>
- Hopkinson, E. C., Fertl, W. H., & Oliver, D. W. (1982). The continuous carbon/oxygen log basic concepts and recent field experiences. *Journal of Petroleum Technology*, 34(10), 2441–2448. <https://doi.org/10.2118/9613-pa>
- Iuras, S., Ahmad, S., Cavalleri, C., & Akashev, Y. (2021). Logging optimization and data analysis enabling bypass pay identification and hydrocarbon quantification with advanced pulsed neutron behind casing. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2021*(SPE 208512), 1–10. <https://doi.org/10.2118/208512-ms>
- Jacobson, L. A., & Wyatt, D. F. (1996). Elemental yields and complex lithology analysis from the pulsed spectral gamma log. *The Log Analyst*, 37(1), 50–64.
- Jacobson, L. A., Etheridge, R., & Simpson, G. (1998). A new small-diameter, high-performance reservoir monitoring tool. *SPWLA 39th Annual Logging Symposium*, Paper K.
- Lock, G. A., & Hoyer, W. A. (1971). Natural gamma-ray spectral logging. *SPWLA 12th Annual Logging Symposium*, Paper AA.

- Mekic, N., McIlroy, C., Hill, F., & Guo, W. (2016). Multidetector pulsed-neutron technology for low-porosity reservoir-interpretation methodology. *SPWLA 57th Annual Logging Symposium*.
- Menge, P. R., Gautier, G., Illis, A., Rozsa, C., & Solovyev, V. (2007). Performance of large lanthanum bromide scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 579(1), 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.04.002>
- Mickael, M., Trcka, D., & Pempers, R. (1999). Dynamic multi-parameter interpretation of dual-detector carbon/oxygen measurements. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1999*(SPE 56649), 1–10. <https://doi.org/10.2118/56649-ms>
- Odom, R. C., Tiller, D. E., & Wilson, R. D. (2002). *Geometrically optimized fast neutron detector* (US Patent No. 6,495,837). U.S. Patent and Trademark Office.
- Odom, R. C., Tittle, C. W., Wilson, R. D., & Soran, P. D. (1992). Quantitative use of computer models in calibration of the Computalog pulsed neutron thermal decay tool (PND). *SPWLA 33rd Annual Logging Symposium*, Paper P.
- Odom, R., Dahlin, T., Dolliver, D., Elizondo, E., Seeds, E., Starnes, J., & Wilson, R. (2008). Design and initial field-test results of a new pulsed neutron logging system for cased reservoir characterization. *SPWLA 49th Annual Logging Symposium*, Paper O.
- Oliver, D. W., Frost, E., & Fertl, W. H. (1981). Continuous carbon/oxygen (C/O) logging – instrumentation, interpretive concepts and field applications. *SPWLA 22nd Annual Logging Symposium*, Paper TT.
- Pemper, R. (2020). A history of nuclear spectroscopy in well logging. *Petrophysics*, 61(6), 523–548. <https://doi.org/10.30632/pjv61n6-2020a1>
- Petrokushyn, O., Abliakimov, L., & Kuznetsov, V. (2024). Cased hole reservoir evaluation in old wells with complex completion and lithology – A case study from a mature gas field in the Dnieper-Donets Basin, Ukraine. *International Petroleum Technology Conference, 2024*(IPTC-24445), 1–10. <https://doi.org/10.2523/iptc-24445-ms>
- Randall, R. R., Lawrence, T. D., Frost, E., & Fertl, W. H. (1985). PDK-100 log examples in the Gulf Coast. *SPWLA 26th Annual Logging Symposium*, Paper XX.
- Randall, R. R., Oliver, D. W., & Fertl, W. H. (1986). The PDK-100 Enhances Interpretation Capabilities for Pulsed Neutron Capture Logs. In *Transactions, SPWLA 27th Annual Logging Symposium* (Paper JJJ). Society of Professional Well Log Analysts.
- Roscoe, B. A., Stoller, C., Adolph, R. A., Boutemy, Y., Cheeseborough, C., Hall, J. S., ... Thomas, S. R. (1991). A New Through-Tubing Oil-Saturation Measurement System. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-21413-MS*. <https://doi.org/10.2118/21413-ms>
- Rose, D., Zhou, T., Beekman, S., Quinlan, T., Delgadillo, M., Gonzalez, G., ... Bailly, J-P. (2015). An Innovative Slim Pulsed Neutron Logging Tool. In *Transactions, SPWLA 56th Annual Logging Symposium* (Paper XXXX). Society of Professional Well Log Analysts.
- Schmid, G. J., Pemper, R., Dolliver, D. D., Mekic, N., & Musselman, J. (2018). A Diffusion-Corrected Sigma Algorithm for a Four-Detector Pulsed-Neutron Logging Tool. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-191738-MS*. <https://doi.org/10.2118/191738-ms>
- Schultz, W. E., Smith, H. D., Jr., Verbout, J. L., Bridges, J. R., & Garcia, G. H. (1983). Experimental Basis for a New Borehole Corrected Pulsed Neutron Capture Logging System (TMD). In *Transactions, SPWLA 24th Annual Logging Symposium* (Paper CC). Society of Professional Well Log Analysts.
- Scott, H. D., Stoller, C., Roscoe, B. A., Plasek, R. E., & Adolph, R. A. (1991). A New Compensated Through-Tubing Carbon/Oxygen Tool for Use in Flowing Wells. In *Transactions, SPWLA 32nd Annual Logging Symposium* (Paper MM). Society of Professional Well Log Analysts.
- Smith, H. D., Jr., Arnold, D. M., & Peelman, H. E. (1983). Applications of a New Borehole Corrected Pulsed Neutron Capture Logging System (TMD). In *Transactions, SPWLA 24th Annual Logging Symposium* (Paper DD). Society of Professional Well Log Analysts.
- Wahl, J. S., Nelligan, W. B., Frenott, A. H., Johnstone, C. W., & Schwartz, R. J. (1970). The Thermal Neutron Decay Time Log. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 10(04), 365–379. <https://doi.org/10.2118/2252-PA>
- Westaway, P., Hertzog, R., & Plasek, R. E. (1983). Neutron-Induced Gamma Ray Spectroscopy for Reservoir Analysis. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 23(03), 553–564. <https://doi.org/10.2118/9461-PA>
- Wichman, P. A., Hopkinson, E. C., & McWhirter, V. C. (1976). The Carbon/Oxygen Log Measurement. *The Log Analyst*, 17(6), 25–29.
- Wichman, P. A., McWhirter, V. C., & Hopkinson, E. C. (1975). Field Results of the Natural Gamma Ray Spectralog. In *Transactions, SPWLA 16th Annual Logging Symposium* (Paper O). Society of Professional Well Log Analysts.
- Wyatt, D., Jacobson, L. A., Durbin, D., & Lasseter, E. (1992). Logging Experience With a New Induced Gamma Spectrometry Tool. In *Transactions, SPWLA 33rd Annual Logging Symposium* (Paper Y). Society of Professional Well Log Analysts.
- Youmans, A. H. (1954). *Static Atmosphere Ion Accelerator for Well Logging* (U.S. Patent No. 2,689,918). U.S. Patent and Trademark Office.
- Youmans, A. H., Bishop, W. D., & Wichmann, P. A. (1970). Applications of the Neutron Lifetime Log in New Wells. In *Transactions, SPWLA 11th Annual Logging Symposium* (Paper N). Society of Professional Well Log Analysts.
- Youmans, A. H., Millis, C. W., Hopkinson, E. C., & Bishop, W. D. (1964). The Neutron Lifetime Log. In *Transactions, SPWLA 5th Annual Logging Symposium* (Paper M). Society of Professional Well Log Analysts.
- Zett, A., Webster, M., Secombe, J., Colbert, C., Rafay Zahid Ansari, & Chace, D. (2011). Extending Production Petrophysics Applications in Monitoring Complex Recovery Mechanisms. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-146662-MS*. <https://doi.org/10.2118/146662-ms>
- Zhou, T., Rose, D., Quinlan, T., Thornton, J., Saldungaray, P., Gerges, N., Bin Mohamed Noordin, F., & Lukman, A. (2016). Fast Neutron Cross-Section Measurement Physics and Applications. In *Transactions, SPWLA 57th Annual Logging Symposium* (Paper EE). Society of Professional Well Log Analysts.

References

- Advancements in shale reservoir characterization optimize capital expenditures. (2019). <https://www.worldoil.com/magazine/2019/march-2019/features/advancements-in-shale-reservoir-characterization-optimize-capital-expenditures/>
- Ansari, R., Mekic, N., Chace, D., Rust, M., & Starr, M. (2009). Field Applications Of A New Cased Hole Gas Saturation Measurement In Tight Gas Reservoirs. In *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*. The Woodlands, Texas.
- Arnold, D.M., Schultz, W.E., & Smith, H.D. Jr. (1973). *Pulsed Neutron Logging System*, US Patent No. 3,780,302.
- Bertoli, S., Borghi, M., Galli, G., Oprescu, A., & Riley, S. (2013). Field Trials of a new Array Pulsed Neutron Formation Gas Measurement in Complex Completions. In *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*. Ravenna, Italy.
- Briesmeister, J.F. (1987). *MCNP—A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport, Version 3A*, National Technical Information Service, US Department of Commerce, Springfield, Virginia. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/044/18044302.pdf
- Cavalleri, C., Akashev, Y., Ahmad, S., Yuras, S., Karpyn, V., & Abdelatif, I. (2021). Advanced Formation Evaluation Approaches in Complex Low-Resistivity Thin Shale Sand Laminations: Success Case Histories from Western Ukraine. <https://doi.org/10.2118/208513-ms>
- Fearon, R.E., & Thayer, J.M. (1955). *Method for Neutron Well Logging*, US Patent No. 2,712,081.
- Fedoryshyn, D. D., & Pyatkovska, I. O. (2012). Complex interpretation of pulsed neutron-neutron logging results and parameters of mathematical statistics to increase gas production from reservoir rocks of thin-layered Neogene deposits. *Oil and Gas Energy*, 2(2). http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nge_2012_2_3 [in Ukrainian].
- Fitz, D. E. (2023). Evolution of Casedhole Nuclear Surveillance Logging Through Time. *Petrophysics*, 64(4), 473–501. <https://doi.org/10.30632/pjv64n4-2023a1>
- Flynn, J., Conley, S., Frost, E., & Fertl, W. H. (1981). *Cased Hole Exploration and Recompletions in West Texas Based on the Continuous Carbon/Oxygen (C/O) Log*. <https://doi.org/10.2118/9714-ms>
- Gilchrist, W. A., Prati, E. J., Pemper, R., Mickael, M., & Trcka, D. (1999). Introduction of a New Through-Tubing Multifunction Pulsed Neutron Instrument. <https://doi.org/10.2118/56803-ms>
- Gilchrist, W.A., Pemper, R.R., Trcka, D., Frost, E. Jr., & Wilson, W. (2000). Initial Field Applications of a New 1.7-Inch Pulsed Neutron Instrument. In *Transactions, SPWLA 41st Annual Logging Symposium*. Dallas, Texas, USA.
- Gyllenstein, A., Al-Arifi, S., Al Hammadi, M., Al Marzouqi, K., Madjidi, A., Mauborgne, M.L., & Weller, G. (2009). Advances in LWD Sigma Measurements and Application to Real-Time Formation Evaluation in Carbonate Reservoirs. In *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*.
- Hertzog, R. C. (1980). Laboratory and field evaluation of an inelastic neutron scattering and capture gamma ray spectrometry tool. *SPE Journal*, 20(05), 327–340. <https://doi.org/10.2118/7430-pa>
- Hopkinson, E. C., Fertl, W. H., & Oliver, D. W. (1982). The continuous carbon/oxygen log basic concepts and recent field experiences. *Journal of Petroleum Technology*, 34(10), 2441–2448. <https://doi.org/10.2118/9613-pa>
- Iuras, S., Ahmad, S., Cavalleri, C., & Akashev, Y. (2021). Logging optimization and data analysis enabling bypass pay identification and hydrocarbon quantification with advanced pulsed neutron behind casing. <https://doi.org/10.2118/208512-ms>
- Jacobson, L. A., & Wyatt, D. F. (1996). Elemental yields and complex lithology analysis from the pulsed spectral gamma log. *The Log Analyst*, 37(1), 50–64.
- Jacobson, L. A., Etheridge, R., & Simpson, G. (1998). A new small-diameter, high-performance reservoir monitoring tool. In *Transactions, SPWLA 39th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Kulinkovich, A. E., Kosachenko, V. D., & Linnik, K. V. (2008). Testing of the method of pulsed neutron-neutron logging in the modification of temporal sounding in the computer technology "Geosearch" on the material of oil and gas wells of the Dnipro-Donets Basin. *Geoinformatika*, 4, 33–38 [in Ukrainian].
- Lock, G. A., & Hoyer, W. A. (1971). Natural gamma-ray spectral logging. In *Transactions, SPWLA 12th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Mekic, N., McIlroy, C., Hill, F., & Guo, W. (2016). Multidetector pulsed-neutron technology for low-porosity reservoir-interpretation methodology. In *SPWLA 57th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Menge, P. R., Gautier, G., Illis, A., Rozsa, C., & Solovyev, V. (2007). Performance of large lanthanum bromide scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 579(1), 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.04.002>

- Mickael, M., Trcka, D., & Pemper, R. (1999). Dynamic multi-parameter interpretation of dual-detector carbon/oxygen measurements. <https://doi.org/10.2118/56649-ms>
- Odom, R. C., Tiller, D. E., & Wilson, R. D. (2002). *Geometrically optimized fast neutron detector*. US Patent No. 6,495,837.
- Odom, R. C., Tittle, C. W., Wilson, R. D., & Soran, P. D. (1992). Quantitative use of computer models in calibration of the Computalog pulsed neutron thermal decay tool (PND). In *Transactions, SPWLA 33rd Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Odom, R., Dahlin, T., Dolliver, D., Elizondo, E., Seeds, E., Starnes, J., & Wilson, R. (2008). Design and initial field-test results of a new pulsed neutron logging system for cased reservoir characterization. In *Transactions, SPWLA 49th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Oliver, D. W., Frost, E., & Fertl, W. H. (1981). Continuous carbon/oxygen (C/O) logging – instrumentation, interpretive concepts and field applications. In *Transactions, SPWLA 22nd Annual SPWLA Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Pemper, R. (2020). A history of nuclear spectroscopy in well logging. *Petrophysics – the SPWLA Journal of Formation Evaluation and Reservoir Description*, 61(6), 523–548. <https://doi.org/10.30632/pjv61n6-2020a1>
- Petrokushyn, O., Abliakimov, L., & Kuznetsov, V. (2024). Cased Hole Reservoir Evaluation in Old Wells with Complex Completion and Lithology – A Case Study from a Mature Gas Field in the Dnieper-Donets Basin, Ukraine. *IPTC-24445-MS*. <https://doi.org/10.2523/iptc-24445-ms>
- Randall, R. R., Lawrence, T. D., Frost, E., & Fertl, W. H. (1985). PDK-100 Log Examples in the Gulf Coast. In *Transactions, SPWLA 26th Annual Logging Symposium* (Paper XX).
- Randall, R. R., Oliver, D. W., & Fertl, W. H. (1986). The PDK-100 Enhances Interpretation Capabilities for Pulsed Neutron Capture Logs. In *Transactions, SPWLA 27th Annual Logging Symposium* (Paper JJJ).
- Roscoe, B. A., Stoller, C., Adolph, R. A., Boutemy, Y., Cheeseborough, C., Hall, J. S., McKeon, D. C., Pittman, D., Seeman, B., & Thomas, S. R. (1991). A New Through-Tubing Oil-Saturation Measurement System. *SPE-21413-MS*. <https://doi.org/10.2118/21413-ms>
- Rose, D., Zhou, T., Beekman, S., Quinlan, T., Delgadillo, M., Gonzalez, G., Fricke, S., Thornton, J., Clinton, D., Gicquel, F., Shestakova, I., Stephenson, K., Stoller, C., Philip, O., La Rotta Marin, J. M., Mainier, S., Perchonok, B., & Bailly, J.-P. (2015). An Innovative Slim Pulsed Neutron Logging Tool. In *Transactions, SPWLA 56th Annual Logging Symposium* (Paper XXXX).
- Ruchko, V. O., & Ruchko, K. O. (2016). Determination of the nature of saturation of low-resistance collectors according to the data of the pulsed neutron-neutron method. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 29–33 [in Ukrainian].
- Schmid, G. J., Pemper, R., Dolliver, D. D., Mekic, N., & Musselman, J. (2018). A Diffusion-Corrected Sigma Algorithm for a Four-Detector Pulsed-Neutron Logging Tool. *SPE-191738-MS*. <https://doi.org/10.2118/191738-ms>
- Schultz, W. E., Smith, H. D., Jr., Verbout, J. L., Bridges, J. R., & Garcia, G. H. (1983). Experimental Basis for a New Borehole Corrected Pulsed Neutron Capture Logging System (TMD). In *Transactions, SPWLA 24th Annual Logging Symposium* (Paper CC).
- Scott, H. D., Stoller, C., Roscoe, B. A., Plasek, R. E., & Adolph, R. A. (1991). A New Compensated Through-Tubing Carbon/Oxygen Tool for Use in Flowing Wells. In *Transactions, SPWLA 32nd Annual Logging Symposium* (Paper MM).
- Smith, H. D., Jr., Arnold, D. M., & Peelman, H. E. (1983). Applications of a New Borehole Corrected Pulsed Neutron Capture Logging System (TMD). In *Transactions, SPWLA 24th Annual Logging Symposium* (Paper DD).
- Vyzhva, S. A., & Onyshchuk, I. I. (2012). *Nuclear geophysics: textbook*. Kyiv University Publishing and Printing Center. [In Ukrainian]
- Vyzhva, S. A., Onyshchuk, V. I., Onyshchuk, I. I., & Shabatura, O. V. (2023). *Nuclear-geophysical methods of well research: textbook*. Kyiv University Publishing and Printing Center. [In Ukrainian]
- Wahl, J. S., Nelligan, W. B., Frentrop, A. H., Johnstone, C. W., & Schwartz, R. J. (1970). The Thermal Neutron Decay Time Log. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 10(04), 365–379. <https://doi.org/10.2118/2252-PA>
- Westaway, P., Hertzog, R., & Plasek, R. E. (1983). Neutron-Induced Gamma Ray Spectroscopy for Reservoir Analysis. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 23(03), 553–564. <https://doi.org/10.2118/9461-PA>
- Wichman, P. A., Hopkinson, E. C., & McWhirter, V. C. (1976). The Carbon/Oxygen Log Measurement. *The Log Analyst*, 17(6), 25–29.
- Wichman, P. A., McWhirter, V. C., & Hopkinson, E. C. (1975). Field Results of the Natural Gamma Ray Spectralog. In *Transactions, SPWLA 16th Annual Logging Symposium* (Paper O).
- Wyatt, D., Jacobson, L. A., Durbin, D., & Lasseter, E. (1992). Logging Experience With a New Induced Gamma Spectrometry Tool. In *Transactions, SPWLA 33rd Annual Logging Symposium* (Paper Y).
- Youmans, A. H. (1954). Static Atmosphere Ion Accelerator for Well Logging (US Patent No. 2,689,918).
- Youmans, A. H., Bishop, W. D., & Wichmann, P. A. (1970). Applications of the Neutron Lifetime Log in New Wells. In *Transactions, SPWLA 11th Annual Logging Symposium* (Paper N).
- Youmans, A. H., Millis, C. W., Hopkinson, E. C., & Bishop, W. D. (1964). The Neutron Lifetime Log. In *Transactions, SPWLA 5th Annual Logging Symposium* (Paper M).
- Zett, A., Webster, M., Seccombe, J., Colbert, C., Rafay Zahid Ansari, & Chace, D. (2011). Extending Production Petrophysics Applications in Monitoring Complex Recovery Mechanisms. *SPE-146662-MS*. <https://doi.org/10.2118/146662-ms>
- Zhou, T., Rose, D., Quinlan, T., Thornton, J., Saldungaray, P., Gerges, N., Bin Mohamed Noordin, F., & Lukman, A. (2016). Fast Neutron Cross-Section Measurement Physics and Applications. In *Transactions, SPWLA 57th Annual Logging Symposium* (Paper EE).

Отримано редакцією журналу / Received: 27.03.25
Прорецензовано / Revised: 10.04.25
Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Oleh PETROKUSHYN, PhD Student (Geol.)
ORCID ID: 0000-0003-0953-2858
e-mail: olehpetrokushyn22@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Iryna BEZRODNA, DSc (Geol.), Assoc. Prof., Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-6835-5276
e-mail: bezin3@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

PULSED NEUTRON LOGGING IN THE WORLD AND IN UKRAINE: BEGGING, ESTABLISHMENT, PRESENT

Background. At present, most of the oil and gas fields in Ukraine are depleted, requiring the operator companies in Ukraine to constantly monitor saturation levels and fluid movement within the reservoirs as these are crucial pieces of information for optimizing and planning further production strategies.

Methods. The development and current state of pulsed neutron logging as one of the main methods of monitoring the development of oil and gas fields is described in the paper.

Results. The article focuses on the history of the establishment of the pulsed neutron logging, starting from 1949. Further development of the technology includes the creation of neutron generators, improvement of methods and equipment, as well as the appearance of modern multi-detector tools. Two main types of pulsed neutron logging are considered: pulsed neutron-neutron logging and pulsed neutron gamma-logging, each has its own advantages and disadvantages. An important stage in the development of pulsed neutron logging was the creation of Sigma logging tools in the 1960s, which measure the neutron capture cross-section and are used to estimate the oil saturation of formation. A significant place in the paper is the analysis of the development of C/O-logging, which was first used in 1971 and determines the ratio of carbon to oxygen for estimating the oil saturation of rocks. The development of multi-detector tools made it possible to acquire logging data through tubing, which significantly expanded the possibilities of pulsed neutron logging. The achievements of domestic geophysicists in the development of pulsed neutron logging in Ukraine are also presented. Modern research is focused on the use of multi-detector tools and MCNP-models for quantitative determination of gas saturation in reservoir rocks. The use of these tools has shown high efficiency in the fields of the Dnieper-Donetsk basin and the Precarpathian depression.

Conclusions. The article concludes that pulsed neutron logging plays a key role in the investigation and monitoring of cased oil and gas wells and suggests further steps for the development of this technology in Ukraine, including the introduction of new detectors, an increase in the number of detectors, and the use of MCNP models for more accurate determination of reservoir saturation.

Keywords: pulsed neutron logging, Sigma-logging, C/O-logging, MCNP-modeling, multi-detector pulsed neutron tools.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.