

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут післядипломної освіти
Кафедра нафтогазової геофізики

Ігуменов Ярослав Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 550.8

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Удосконалення апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу з метою
підвищення достовірності встановлення характеру насичення порід-колекторів

(назва роботи)

Геофізика

(назва освітньої програми)

103 «Науки про Землю»

(шифр і назва спеціальності)

Я. А. Ігуменов

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Коваль Ярослав Миколайович, к.г.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент В. В. Федорів

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент В. В. Федорів

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2025 р

Інститут післядипломної освіти
Кафедра нафтогазової геофізики
Освітній ступінь магістр
Спеціальність 103 «Науки про Землю»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри НГГ
доц. Федорів В. В.
“ ” 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Ігуменову Ярославу Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу з метою підвищення достовірності встановлення характеру насичення порід-колекторів

Керівник роботи Коваль Ярослав Миколайович

Затверджена наказом закладу вищої освіти від «02» грудня 2025 р. №239/12.

2. Строк подання студентом роботи 18 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Завдання на магістерську роботу. Спеціалізована література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.

2) Вступ.

3) Огляд сучасного стану розвитку апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу для

оцінки характеру насичення порід-колекторів.

4) Аналіз особливостей вимірювання нейтронних параметрів гірських порід методом імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу.

5) Удосконалення апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу.

6) Визначення поточного характеру насичення порід-колекторів методом ІННК.

7) Висновки.

8) Перелік використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація у кількості 12 слайдів

6.Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 20 жовтня 2025 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд сучасного стану розвитку апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу для оцінки характеру насичення порід-колекторів.	20.10.2025-30.10.2025	
2.	Аналіз особливостей вимірювання нейтронних параметрів гірських порід методом імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу.	31.10.2025-13.11.2025	
3	Удосконалення апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу.	14.11.2025-04.12.2025	
4.	Визначення поточного характеру насичення порід-колекторів методом ІННК.	05.12.2025-11.12.2025	
6.	Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів. Вступ. Висновки. Перелік використаних джерел.	12.12.2025-18.12.2025	

Студент

(підпис)*Ігуменов Я.А.*_____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)*Коваль Я.М.*_____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота на тему «Удосконалення апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу з метою підвищення достовірності встановлення характеру насичення порід-колекторів» складається із п'яти розділів і містить 81 сторінку, 1 таблицю, 18 рисунків та 27 літературних джерела.

Магістерська робота присвячена удосконаленню апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу (ІННК) з метою підвищення достовірності визначення поточного характеру насичення порід-колекторів у свердловинах. Проведено аналіз сучасного стану розвитку імпульсних нейтронних методів, розглянуто фізичні основи реєстрації теплових нейтронів та вплив свердловинних умов на результативність вимірювань. Встановлено ключові фактори, які спричиняють похибки при визначенні нейтронних параметрів пласта: нестабільність генератора, відсутність моніторингового каналу, зміна складу флюїдів у присвердловинній зоні, діаметр та ексцентриситет зонда. На основі проведених досліджень запропоновано комплекс апаратурних рішень – удосконалення генератора, системи живлення, схеми детектування та конструкції свердловинного приладу. Розроблені технічні рішення дозволяють підвищити чутливість апаратури до змін водо-, нафто- та газонасичення, розширити робочий діапазон умов та забезпечити стабільність реєстрації нейтронного поля. Робота є важливим внеском у розвиток сучасних ядерно-геофізичних методів контролю стану пластів у обсаджених свердловинах.

Ключові слова: свердловинний прилад, удосконалення, блок, нейтрони, час життя, декремент затухання, імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж, характер насичення.

ABSTRACT

The Master's thesis titled «Improvement of Pulsed Neutron-Neutron Logging Equipment Aimed at Increasing the Reliability of Determining the Saturation Type of Reservoir Rocks» consists of five chapters and includes 81 pages, 1 table, 18 figures, and 27 references.

The thesis is devoted to improving the equipment of pulsed neutron-neutron logging (PNNL) in order to enhance the reliability of determining the current saturation state of reservoir rocks in well conditions. The work provides an analysis of the current development of pulsed neutron methods, examines the physical principles of thermal-neutron registration, and assesses the influence of wellbore conditions on measurement accuracy. Key factors causing errors in determining neutron parameters of the formation were identified, including generator instability, the absence of a monitoring channel, changes in fluid composition within the near-wellbore zone, as well as the diameter and eccentricity of the probe. Based on the conducted research, a set of technical solutions was proposed – improvement of the neutron generator, power-supply system, detection scheme, and the design of the downhole instrument. The developed engineering solutions increase the sensitivity of the equipment to variations in water, oil, and gas saturation, expand the operational range of working conditions, and ensure stable registration of the neutron field. This work represents an important contribution to the development of modern nuclear-geophysical methods for monitoring reservoir conditions in cased wells.

Keywords: downhole tool, improvement, block, neutrons, neutron lifetime, decay decrement, pulsed neutron-neutron logging, saturation type.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ АПАРАТУРИ ІМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОН-НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖУ ДЛЯ ОЦІНКИ ХАРАКТЕРУ НАСИЧЕННЯ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ.....	10
1.1. Роль імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу при вирішенні задач з контролю за насиченням порід-колекторів.....	10
1.2. Фізичні основи імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу та зв'язок з параметрами насичення.....	11
1.3. Еволюція апаратури: від перших інструментів до багатодетекторних систем.....	12
1.4. Сучасні напрями удосконалення апаратури імпульсного нейтрон- нейтронного каротажу.....	13
1.5 Підвищення достовірності визначення характеру насичення за рахунок апаратурних рішень.....	14
1.6 Досягнення українських дослідників у розвитку ІННК.....	16
2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИМІРЮВАННЯ НЕЙТРОННИХ ПАРАМЕТРІВ ГІРСЬКИХ ПОРІД МЕТОДОМ ІМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОН-НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖУ.....	19
2.1 Обґрунтування проблеми забезпечення достовірності визначення нейтронних характеристик порід під час виконання імпульсного нейтрон- нейтронного каротажу.....	19
2.2 Вплив свердловинних умов на просторово-часовий розподіл нейтронів.....	22
3 УДОСКОНАЛЕННЯ АПАРАТУРИ ІМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОН- НЕЙТРОННОГО	32

КАРОТАЖУ.....	
3.1 Основні вимоги до апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу.....	32
3.2 Вибір джерела випромінювання швидких нейтронів для проведення дослідження свердловин методом імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу.....	33
3.3. Вибір детектора теплових нейтронів.....	37
3.4 Вибір оптимальної системи живлення свердловинних приладів імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу.....	43
3.5 Побудови інформаційно-вимірювальної системи апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу.....	50
3.6 Удосконалення функціональної схеми свердловинного приладу імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу.....	54
3.7 Удосконалення принципової електричної схеми електронного блоку свердловинного приладу імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу	57
3.8 Удосконалення конструкції свердловинного приладу імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу.....	65
4 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОЧНОГО ХАРАКТЕРУ НАСИЧЕННЯ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ МЕТОДОМ ІННК.....	68
4.1 Моделювання нейтронних характеристик порід-колекторів.....	68
4.2 Визначення поточного коефіцієнта насичення порід-колекторів методом ІННК.....	73
ВИСНОВКИ.....	78
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

БЕ	блок електронний
БЖВ	блок живлення високої напруги
БЖН	блок живлення низької напруги
БЖУ	блоку живлення і управління
БРП	блок реєстрації перетворення
БПМК	блок перетворення моніторингового каналу
БС	блок стабілізації
БТ	блок трубки
ГН	генератор нейтронів
ІННК	імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж
ІГН	імпульсний генератор нейтронів
НТ	нейтронна трубка
ПФ	підсилювач і формувач
СКЕЧ	сильнострумовий комутуючий елемент частотний
СП	свердловинний прилад
СДЖ	схема множення напруги
ФІУ	формувач імпульсів управління
Σ_z	макроскопічне січення захоплення, m^{-1}
Σ_p	макроскопічне січення розсіювання, m^{-1}
N_A	стала Авогадро
D	коефіцієнт дифузії
L_s	довжина сповільнення, м
τ_n	час життя нейтронів, мкс
τ_z	час сповільнення нейтронів, мкс
τ_d	час дифузії, мкс
K_p	коефіцієнт пористості, %
$K_{нг}$	коефіцієнт нафтогазонасичення, %
K_{gl}	коефіцієнт об'ємної глинистості, %
K_v	коефіцієнт водонасичення, %

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах виснаження продуктивних нафтогазових родовищ та ускладнення геологічної будови пластів зростає потреба у високоточних методах контролю за поточним характером насичення порід-колекторів. Традиційні електричні методи геофізичних досліджень у обсаджених свердловинах втрачають інформативність, особливо в низькоомних, тонкошаруватих та багатофазно насичених товщах. Тому імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж (ІННК) набуває ключового значення як один із найбільш надійних методів визначення водонасичення, газонасичення та оцінки змін у присвердловинній зоні. Разом із тим достовірність визначення параметрів насичення істотно залежить від апаратурних характеристик: стабільності виходу нейтронів, чутливості детекторів, типу генератора, особливостей геометрії зонда та режимів реєстрації. Недосконалість цих елементів призводить до значних похибок інтерпретації, що ускладнює вирішення технологічних та геологічних задач.

У зв'язку з цим основним напрямом розвитку ІННК є створення удосконалених свердловинних комплексів, які забезпечують стабільні параметри нейтронного поля, можливість роботи в широкому діапазоні геолого-технічних умов та підвищену чутливість до мінливості характеристик насичення.

Мета роботи. Удосконалення апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу з метою підвищення достовірності визначення характеру насичення порід-колекторів у свердловинних умовах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан розвитку імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу та його роль при контролі за насиченням пластів.
2. Проаналізувати основні чинники, які впливають на достовірність визначення нейтронних параметрів порід-колекторів.

3. Обґрунтувати вимоги до сучасної апаратури та вибрати оптимальний тип нейтронного генератора й детекторів.

4. Розробити та обґрунтувати шляхи удосконалення конструкції свердловинного приладу, електронного блоку та системи живлення.

Об'єкт дослідження. Процеси формування та реєстрації нестационарних потоків теплових нейтронів у свердловинних умовах під час виконання імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу.

Предмет дослідження. Апаратурні характеристики, конструктивні рішення та параметри роботи свердловинних приладів ІННК, що впливають на достовірність визначення характеру насичення порід-колекторів.

Методи дослідження. Комплекс теоретичних, аналітичних, експериментальних та інженерно-конструкторських методів.

Новизна одержаних результатів. Запропоновано конструктивні удосконалення свердловинної апаратури ІННК, які забезпечать стабільність її роботи і підвищать достовірність отриманих даних в процесі каротажу

Обсяг і структура роботи. Магістерська робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 27 найменувань. Повний обсяг магістерської роботи – 81 сторінка друкованого тексту комп'ютерного набору, ілюстрованого 1 таблицею та 18 рисунками.

ІМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОН-НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖУ ДЛЯ ОЦІНКИ ХАРАКТЕРУ НАСИЧЕННЯ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ

1.1. Роль імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу при вирішенні задач з контролю за насиченням порід-колекторів

У міру виснаження більшості нафтогазових родовищ світу, зокрема й України, зростає потреба у високодостовірному моніторингу поточного насичення продуктивних пластів через обсадну колону. Саме імпульсний нейтронний каротаж (pulsed neutron logging, PNL), а зокрема імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж (ІННК, PNN), став одним із базових методів контролю водо-, нафто- і газонасичення в експлуатаційних свердловинах, де типовий комплекс електричних методів геофізичних досліджень свердловин (ГДС) уже неможливо виконати.

Імпульсний нейтрон-нейтронний метод був запропонований Г. Н. Фльоровим у 1956 році, а перші експериментальні випробування апаратури та методики його застосування відбулися у 1959-1960 рр. Уже за відносно короткий проміжок часу ця технологія зазнала суттєвого розвитку та знайшла практичне використання під час каротажу нафтових і газових свердловин. Окрім того, були виконані перші дослідження щодо оцінки ефективності методу під час обробки рудних свердловин.

Огляд Олега Петрокушина та Ірини Безродної [1] показує, що історія імпульсного нейтронного каротажу починається з робіт 1940-1950-х років, пов'язаних із створенням перших нейтронних генераторів та патентуванням методів нейтронного каротажу. Подальший розвиток пов'язаний із появою приладів для вимірювання часу затухання теплових нейтронів (neutron lifetime, thermal neutron decay time) та макроскопічного перетину поглинання Σ , що дозволило використовувати PNL як стандартний метод для визначення водонасичення у закритому стовбурі нафтогазових свердловин [1].

Для умов України особливо важливим є застосування імпульсного

нейтрон-нейтронного каротажу у низькоомних, тонкошаруватих та складних за літологією пластах Дніпровсько-Донецької западини та Передкарпатського прогину. Праці Ручка В.О. і Ручка К.О. [2], Куганського В.М. і Ручка К.О. [3] показують, що ІННК дозволяє надійніше визначати характер насичення низькоомних колекторів, де класичні методи відкритого ствола часто дають неоднозначні результати.

1.2. Фізичні основи імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу та зв'язок з параметрами насичення

Імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж базується на реєстрації поля теплових нейтронів, що виникає внаслідок випромінювання коротких імпульсів швидких нейтронів (D – T-генератор) та їх подальшого сповільнення й захоплення в пласті. при цьому інформативними параметрами є:

- час життя теплових нейтронів);
- макроскопічний перетин поглинання Σ ;
- часові й просторові розподіли густини теплових нейтронів у зоні навколо свердловини.

Оскільки головним поглиначем теплових нейтронів у пористому середовищі виступають хлор-йони пластової води, величина Σ та часові характеристики затухання нейтронів тісно пов'язані з водонасиченням, а отже – з наявністю чи відсутністю вуглеводнів у поровому просторі. Саме ця залежність лежить в основі більшості алгоритмів визначення коефіцієнтів насичення за даними ІННК [4].

Численні роботи, виконані з використанням Монте-Карло моделювання (MCNP), демонструють, що форма часових спектрів теплових нейтронів суттєво залежить від пористості, водонасичення, мінералізації, а також геометрії свердловини та обсадної колони [5]. Це зумовлює необхідність постійного вдосконалення апаратури та схем детектування з метою

підвищення роздільної здатності та точності оцінки насичення.

1.3. Еволюція апаратури: від перших інструментів до багатодетекторних систем

Перші промислові імпульсні нейтронні прилади, описані в патенті Arnold et al. (1973), були дводетекторними системами з обмеженою енергетичною роздільною здатністю гамма-детекторів та нестабільною роботою нейтронних генераторів [6]. Подальше вдосконалення апаратури йшло в кількох напрямках:

1. Поліпшення нейтронних генераторів.

Перехід від ранніх газорозрядних джерел до компактних високочастотних D – T-генераторів забезпечив стабільніший потік швидких нейтронів, менший габарит приладів та можливість застосування в тонких і глибоких свердловинах. Огляд еволюції нейтронних генераторів наведено в роботах Remper (2020) та Fitz (2023), присвячених історії ядерно-геофізичних методів у каротажі [7, 8].

2. Розвиток детекторів.

Використання великих сцинтиляційних кристалів на основі $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ дозволило істотно підвищити енергетичну роздільну здатність і ефективність реєстрації гамма-квантів, що критично для спектральних імпульсних нейтрон-гамма вимірювань (C/O-, Sigma-каротаж) [9].

3. Перехід до багатодетекторних схем.

Стаття Gilchrist et al. (1999) описує введення багатофункціонального через трубного PNL-інструмента, що поєднував вимірювання Σ , інтервальної пористості та спектральних характеристик [10]. Пізніше було створено чотири- та п'ятидетекторні системи (FDPN), які забезпечують одночасне отримання Sigma-, C/O- та додаткових параметрів, що дозволяє розв'язувати задачі трифазної насиченості та моніторингу складних багатобар'єрних систем [11].

Сучасні промислові системи (Schlumberger RSTPro, Weatherford Raptor 2.0, Halliburton RMT-3D, серія інструментів PNNplus та ін.) декларують значно вищу чутливість до змін насичення, можливість роботи в умовах високих температур і тисків та реалізацію розширеного набору вимірюваних параметрів у межах одного спуску [12-15].

1.4. Сучасні напрями удосконалення апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу

1.4.1 Багатодетекторні та високочутливі системи. Одним із головних трендів останніх десятиліть стало збільшення числа детекторів та оптимізація їхнього просторового розташування. Робота Mekic et al. (2016) демонструє, що багатодетекторна імпульсна нейтронна технологія істотно розширює діапазон надійної інтерпретації в низькопористих колекторах і складних обсадних компоновках [16].

Zhang et al. (2013) за допомогою Монте-Карло моделювання показали, що використання тридетекторного PNN-інструмента дає вищу чутливість до газонасичення в щільних газових колекторах порівняно з традиційними методами, які базуються на простих відношеннях показів лічильників [5]. Це підтверджує, що апаратурні рішення (кількість і розташування детекторів, енергетичне «вікно» детектування тощо) безпосередньо впливають на достовірність оцінки насичення.

У новітніх публікаціях описуються slim-інструменти з великою глибиною дослідження, які поєднують вдосконалений генератор, масив LaBr₃-детекторів та оновлену електроніку для пришвидшеної реєстрації та передачі даних [17]. Такі системи орієнтовані на трифазний аналіз (вода–нафта–газ) у режимі «один спуск – повна модель насиченості» [18].

1.4.2. Робота в складних термобаричних умовах. Іншим важливим напрямом удосконалення є розширення робочого діапазону температур і тисків. Сучасні інструменти PNNplus дозволяють проводити вимірювання

при температурах вище 200 °С без втрати характеристик детекторів і ресурсу нейтронного генератора, що робить можливим застосування ІННК у глибоких і високотемпературних свердловинах [19].

Високотемпературна стійкість та підвищена механічна надійність конструкції безпосередньо впливають на стабільність калібрування і, відповідно, на повторюваність та достовірність вимірних параметрів насичення.

1.4.3. Пам'ятні та автономні прилади. Окремий клас становлять пам'ятні (memory) ІННК-інструменти, які працюють без дротяної лінії, із подальшою розгрузкою даних на поверхні. Arbuzov et al. описують принципи роботи й переваги такого приладу МІНК для моніторингу насичення в горизонтальних і сильно девіаційних свердловинах [19].

Автономний режим дозволяє проводити вимірювання в умовах обмеженого доступу для традиційного каротажу, однак висуває підвищені вимоги до стабільності генератора, енергонезалежної пам'яті та системи внутрішньої калібровки, що знову ж таки прямо пов'язано з удосконаленням апаратури.

1.5 Підвищення достовірності визначення характеру насичення за рахунок апаратурних рішень

1.5.1 Низькоомні та тонкошаруваті колектори. Для низькоомних колекторів та пластів зі змішаним насиченням класичні методи відкритого ствола часто не дозволяють надійно розрізнити водо- й нафтонасичені інтервали. Роботи Ручка В. й Куганського В. (2016) показують, що поєднання кількох нейтронних характеристик (час життя, Σ , інтенсивність теплових нейтронів) дозволяє більш упевнено визначати характер насичення та коефіцієнт нафтогазонасичення низькоомних колекторів ДДЗ [2, 3].

Федоришин і П'ятковська (2012) застосували статистичні критерії до результатів ІННК для тонкошаруватих неогенових відкладів, показавши, що

за рахунок раціонального вибору параметрів і режимів вимірювань можна підвищити надійність виділення газонасичених пропластків і оптимізувати роботу промислового геофізичного комплексу [4].

1.5.2 Вплив мінералізації води та складних флюїдних систем. Однією з ключових проблем Sigma-та neutron-lifetime-каротажу є залежність результатів від мінералізації пластових вод. Amer et al. (2018) запропонували і апробували нову методику імпульсного нейтронного каротажу для умов невизначеної мінералізації в карбонатних колекторах Абу-Дабі, яка поєднує режими Σ та C/O для підвищення надійності оцінки водонасичення [17].

Eltaher et al. (2018) системно проаналізували фактори, які впливають на результати C/O-логів – зокрема, вплив фільтрату бурового розчину, реінвазії флюїдів через перфорацію та зміну властивостей флюїдів у часі. Показано, що неконтрольований вплив цих чинників може призводити до суттєвої невідповідності між оцінками водонасичення за PNL та даними історії видобутку, що накладає вимоги на конструкцію приладу (глибина дослідження, конфігурація детекторів) і вибір оптимальних апаратурних режимів [19].

У роботі Liu et al. (2018) запропоновано метод оцінки газонасичення за даними PNL у обсаджених свердловинах, який має вищу чутливість до газу порівняно з класичною Σ -методикою. Методика фактично спирається на вдосконалену схему детектування і обробки сигналів, що зменшує вплив мінералізації й пористості на результат [20].

1.5.3 Монте-Карло моделювання як інструмент оптимізації апаратури. Розвиток обчислювальних можливостей зробив MCNP-моделювання стандартним інструментом при проектуванні та калібруванні PNN-інструментів. Класична робота Briesmeister (1987) заклала методичну основу використання MCNP для задач нейтронного транспорту, а численні пізніші дослідження показали ефективність Монте-Карло-моделей для оптимізації розташування детекторів, вибору енергії нейтронів та оцінки глибини дослідження [18].

Zhang et al. (2007, 2013) продемонстрували, що за допомогою моделювання можна кількісно оцінити вплив пористості, газонасичення, мінералізації та розміру свердловини на часові спектри теплових нейтронів і таким чином обґрунтувати структуру тридетекторного PNN-інструмента, який має підвищену чутливість до газу в щільних колекторах [5].

У новітніх роботах, присвячених моделюванню швидких нейтронних перетинів і кількісної оцінки газонасичення в складних піщано-алевролітових розрізах, Монте-Карло підходи використовуються не лише для калібрування апаратури, а й для побудови інверсійних алгоритмів, які враховують вплив глинистості та тонкошаруватості [5].

1.6 Досягнення українських дослідників у розвитку ІННК

В останні роки в Україні відзначається зростання кількості робіт, присвячених імпульсному нейтронному каротажу. Окрім згаданих статей Ручка В.О., Федоришина Д. Д., Кулінковича А. Є. та ін., вагомий внесок зроблено у вигляді навчальних посібників з ядерної геофізики та ядерно-геофізичних методів дослідження свердловин (Вижва С. А. та співавт., 2012; 2023), де систематизовано фізичні основи, апаратурні рішення та інтерпретаційні підходи для PNN- та PNC-методів [21, 22].

Петрокушин О.Є. і Безродна І. М. (2025) узагальнили історію впровадження імпульсного нейтронного каротажу в Україні, показавши успішні приклади використання мультidetекторних приладів і MCNP-моделей для кількісної оцінки газонасичення колекторів Дніпровсько-Донецької западини та Передкарпатського прогину [1].

Нагорняк Р.І. дослідив можливості ІННК для визначення залишкового водонасичення колекторів, що є особливо важливим для задач обґрунтування заходів з підвищення нафтовилучення [23].

Ці роботи формують наукову й методичну базу для подальшого вдосконалення вітчизняної апаратури ІННК з урахуванням специфіки

українських родовищ — тонкошаруватих, низькоомних, із складним геологічним розрізом.

Висновок

Аналіз літератури свідчить, що імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж є одним із ключових інструментів контролю насичення порід-колекторів у обсаджених свердловинах і продовжує активно розвиватися в напрямі:

- удосконалення нейтронних генераторів і детекторів (зокрема LaBr_3 -сцинтиляторів);
- переходу до багатодетекторних схем (3-5 і більше детекторів) з розширеним набором вимірюваних параметрів (Σ , C/O, індекс водню, спеціальні комбіновані параметри);
- розширення робочих діапазонів температур і тисків, створення slim-та high-temperature-інструментів;
- впровадження автономних PNN-комплексів;
- широкого використання Монте-Карло моделювання для оптимізації апаратури, калібрування та побудови інверсійних алгоритмів.

Удосконалення апаратури безпосередньо спрямоване на підвищення достовірності визначення характеру насичення, особливо в складних умовах – для низькоомних, тонкошаруватих, тріщинно-порових і багатофазно насичених колекторів. Сучасні дослідження демонструють, що саме комплекс апаратурних рішень (багатодетекторність, оптимізована геометрія, високочутливі детектори, розширені режими вимірювань) у поєднанні з продвинутими алгоритмами обробки даних дозволяє досягти суттєвого зменшення невизначеності в оцінці водо-, нафто- та газонасичення.

2 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИМІРЮВАННЯ НЕЙТРОННИХ ПАРАМЕТРІВ ГІРСЬКИХ ПОРІД МЕТОДОМ ІМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОН-НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖУ

2.1 Обґрунтування проблеми забезпечення достовірності визначення нейтронних характеристик порід під час виконання імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу

Методика визначення характеру насичення пластів за даними імпульсних нейтронних методів ґрунтується на різниці часу життя теплових

нейтронів у середовищах, насичених нафтою та пластовою водою. Такий підхід є ефективним лише за умови достатньо високої мінералізації пластової води (не менше 50-70 г/л), оскільки зі зменшенням мінералізації істотно падає точність визначення коефіцієнта насичення. За цих умов нейтронно-поглинальна здатність середовища прямо залежить від коефіцієнта водонасичення порового простору [24, 25], а імпульсні нейтронні методи стають найбільш інформативними для кількісної оцінки насичення.

Подальше підвищення якості ядерно-геофізичних досліджень нафтових і газових свердловин пов'язане з розвитком імпульсного нейтронного каротажу до рівня надійного кількісного визначення нейтронних параметрів порід і збільшення просторової деталізації вимірювань. Удосконалення апаратури ІННК передбачає насамперед зменшення інструментальної похибки за рахунок застосування високоякісних свердловинних генераторів нейтронів.

Типовий свердловинний прилад ІННК включає секцію генератора імпульсного потоку швидких нейтронів та секцію реєстрації, яка забезпечує детектування теплових нейтронів, первинну обробку сигналів і передачу інформації на поверхню. Енергоспоживання вимірювального тракту можна частково зменшити завдяки малопотужній схемотехніці, однак потужність, потрібна для генерації нейтронів вакуумною трубкою (близько 25 Вт для потоку порядку 10^8 14-MeV нейтронів/с), залишається основною складовою енергоспоживання свердловинного приладу [24].

Нестабільність живлення генератора призводить до коливань виходу нейтронів і, відповідно, до зниження інформативності методу. Тому необхідний постійний моніторинг потоку швидких нейтронів за допомогою газонаповнених або твердотілих детекторів. На сучасному етапі найбільш доцільним є використання окремого блоку моніторингу джерела швидких нейтронів, що потребує передбачення його живлення та відповідних конструктивних рішень.

Ключовим показником якості свердловинного генератора є вихід 14-

MeV нейтронів, який визначає інформативність і експресність каротажу. Внаслідок різноманітності типів генераторів і розкиду їх характеристик широкий діапазон виходів може знижувати якість результатів. Аналогічна проблема виникає і зі стаціонарними генераторами при нейтронно-активаційному аналізі рідин. Це обумовлює актуальність оперативного контролю абсолютного значення виходу 14-MeV нейтронів і його відповідності технічним вимогам і геолого-промисловим задачам.

Системи контролю виходу нейтронів поділяють на два основні типи. Перший реалізовано у вигляді систем моніторингу для газонаповнених свердловинних генераторів (наприклад, прилади фірми «Schlumberger» із пропорційним лічильником у водневмісному матеріалі, який працює за методом протонів віддачі). Лічильник розміщують зовні нейтронної трубки біля мішені, а сигнал монітора використовують для автоматичної стабілізації високої напруги й виходу нейтронів. У деяких схемах стабілізація здійснюється за рахунок коронного розряду між катодом і додатковим кільцевим електродом, напруга на який подається залежно від показів монітора.

Другий тип систем спирається на активаційні методи без зворотного зв'язку з джерелом живлення. У таких моніторах застосовують активацію бору та сцинтиляційні лічильники швидких нейтронів (суміш ZnS(Ag) з бором, збагаченим ^{11}B), які забезпечують високу чутливість при потоці $(2-3) \cdot 10^7$ нейтр/с. Подальші розробки дозволили створити монітори для контролю виходу до 10^9 нейтр/с (активація кисню в склі) та прилади типу СЧ-3 і УНІ-1, що працюють на принципі сповільнення нейтронів до теплових і їх реєстрації борними чи срібними детекторами.

Використання порогових детекторів підвищує енергетичну вибірковість моніторів і зменшує вплив розсіяних нейтронів. На основі теоретичних і експериментальних досліджень оптимізовано матеріали, геометрію радіаторів і мішеней, а також амплітудно-часові параметри селекції, що дозволило досягти необхідних показників чутливості,

стабільності та інерційності при вимірюванні імпульсних потоків 14-MeV нейтронів.

Особливо ефективними є монітори на базі дисперсних сцинтиляційних лічильників із ізотопом ^{11}B , які забезпечують чутливість до виходу 14-MeV нейтронів на рівні $\sim 10^{-6}$ імп/нейтр при діаметрі сцинтилятора 30-50 мм. Вплив розсіяних нейтронів зростає з довжиною зонда, але залишається прийнятним у робочому діапазоні, а внесок запізнілих нейтронів в урановмісних породах зазвичай невеликий.

Отже, моніторинг потоку нейтронів за допомогою газонаповнених, твердотілих або газорозрядних детекторів теплових нейтронів є оптимальним для отримання достовірної інформації про роботу генератора. Додаткова стабілізація живлення свердловинного генератора дозволяє підвищити точність вимірювань нейтронних параметрів гірських порід і, відповідно, достовірність оцінки характеру насичення пластів.

2.2 Вплив свердловинних умов на просторово-часовий розподіл нейтронів

Для умов імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу, коли джерело швидких нейтронів і детектор теплових нейтронів розташовані в свердловині на відстані R один від одного, зареєстроване нейтронне поле визначається як параметрами свердловини (τ_1 та D_1), так і параметрами пласта (τ_2 та D_2). Характер формування просторово-часового нейтронного поля залежить від співвідношення між цими параметрами [24, 25].

Зазвичай свердловина заповнена водою або нафтою, для яких значення τ та D є меншими, ніж у порід пласта. У такому випадку виконується $\tau_2 > \tau_1$ і $D_2 > D_1$, що відповідає режиму слабкого поглинання нейтронів у пласті. Після швидкого сповільнення до теплових енергій нейтрони спочатку накопичуються у свердловинному просторі поблизу джерела. Далі,

відповідно до законів дифузії, теплові нейтрони переміщуються з області високої концентрації до області з нижчою концентрацією – уздовж осі свердловини та з її простору в пласт.

У процесі часу кількість теплових нейтронів зменшується за експоненційним законом $e^{-t/\tau}$. Оскільки $\tau_2 > \tau_1$, нейтронна щільність у свердловині спадає швидше, ніж у пласті. Так само і просторове затухання потоку теплових нейтронів у свердловині є швидшим, ніж у пласті ($D_2 > D_1$). Через певний проміжок часу концентрація теплових нейтронів у свердловині стає меншою, ніж у навколишній породі, і виникає дифузійний потік нейтронів з пласта у свердловину. На цьому етапі характер поля визначається переважно параметрами τ_2 і D_2 .

Отже, при слабкому поглинанні нейтронів пластом, на достатньо великих часах затримки та відстанях від джерела, детектор ІННК реєструє поле, що майже не залежить від параметрів свердловини та визначається властивостями пласта. Саме ця особливість робить імпульсні нейтронні методи значно менш чутливими до впливу свердловинних умов порівняно зі стаціонарними методами.

У випадку, коли поглинання нейтронів пластом є сильнішим, ніж у свердловині ($\tau_2 < \tau_1$, але $D_2 > D_1$), вплив свердловини проявляється на будь-яких часах і відстанях від джерела. За таких умов визначення нейтронних параметрів пласта ускладнюється та стає менш достовірним [25].

2.2.1 Асимптотичний розподіл нейтронів в свердловині. У випадку незначного поглинання поле теплових нейтронів при великих значеннях t відображається формулою [25]:

$$n(R, t) = \left\{ \frac{Q_0}{(4\pi D_2 t)^{3/2}} e^{-t/\tau_2 - \frac{R^2}{4D_2 t}} \right\} f(t), \quad (2.1)$$

де $f(t)$ – множник який мало залежить від часу;

Q_0 – потужність джерела.

Е данному випадку покази ІННК однозначно пов'язані із величинами τ_2 та D_2 . У випадку потужного поглинання нейтронів в пласті (тобто $\tau_2 < \tau_1$) розподіл теплових нейтронів на великих часах буде відображатись формулою (2.1), але при певних ефективних параметрах τ_{ef} і D_{ef} . Значення величин τ_{ef} і D_{ef} також залежить від параметрів пласта та свердловини, але при всіх можливих комбінаціях параметри $\tau_1, \tau_2, D_1, D_2, d_{скв}$ знаходяться в наступних межах:

$$\tau_1 \geq \tau_{ef} \geq \tau_2 \quad (2.2)$$

$$D_1 \geq D_{ef} \geq D_2, \quad (2.3)$$

Отже, сильне поглинання нейтронів у пласті ($\tau_2 < \tau_1$) не дозволяє використовувати метод ІННК, так як для визначення параметрів пласта необхідно враховувати параметри свердловини [25].

2.2.2 Вплив діаметра свердловини на покази ІННК. Якщо припустити, що прилад ІННК встановлений по осі свердловини, а її діаметр поступово збільшується. У такому разі покази детектора в один і той самий момент часу змінюватимуться: від значень, характерних для суцільного однорідного пласта без свердловини, до значень, притаманних однорідному середовищу з порожниною свердловини, заповненою водою чи буровим розчином. На рисунку 2.1 наведено результати моделювання впливу свердловини для точкового джерела і точкового детектора, розташованих на її осі.

Аналіз графіків (рис. 2.1) свідчить, що при слабкому поглинанні нейтронів у пласті ($\tau_2 > \tau_1$) абсолютна густина теплових нейтронів на осі свердловини зменшується зі збільшенням її діаметра. У випадку ж сильного поглинання ($\tau_2 < \tau_1$) вона, навпаки, зростає. Ці зміни тривають доти, доки товщина проміжного шару між приладом ІННК і стінкою свердловини не стане рівною r_0 – радіусу дослідження методу. При цьому контрастність показів ІННК між пластами з різними властивостями зменшується зі збільшенням діаметра свердловини, і зрештою може повністю зникнути, що

призводить до втрати чутливості методу до параметрів пласта за умов $\tau_2 > \tau_1$.

Зміна діаметра свердловини впливає на форму часових спектрів теплових нейтронів, що проілюстровано на рисунку 2.2. На кривих залежності ($N = f(t)$), зареєстрованих у свердловинних умовах, на відміну від однорідного середовища, можна виділити дві характерні ділянки на правій гілці. Початковий сегмент (до $t = 1000-1500$ мкс) вирізняється більш крутим спадом, крутизна якого збільшується зі зростанням діаметра свердловини і визначається переважно параметрами свердловинного простору. Наступний сегмент – права частина заінверсійної гілки ($t = 1500-4000$ мкс) – має експоненційний характер, причому її нахил визначається головним чином величиною (τ_2) пласта і лише незначною мірою залежить від діаметра свердловини.

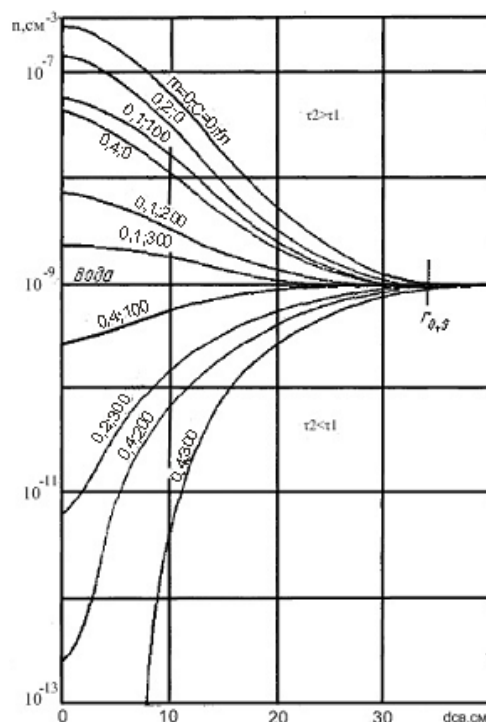


Рисунок 2.1 – Залежність густини теплових нейтронів від діаметра свердловини (свердловина заповнена прісною водою), що розкрила пласт-пісковика із вологістю m і мінералізацією пластової води C ($R=20$ см, $t=2200$ мксек, діаметром зонда не береться до уваги)

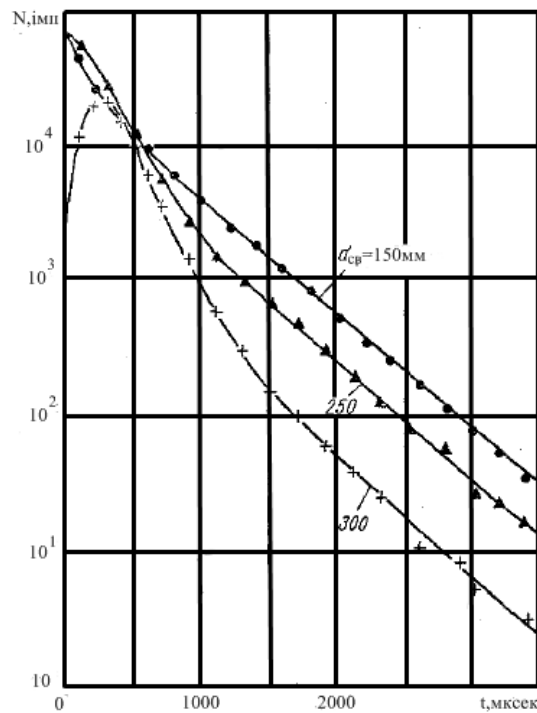


Рисунок 2.2 – Часовий спектр теплових нейтронів у свердловинах різного діаметра ($\tau_1=205$ мксек), розкритих пласт піскови́ка ($\tau_2=600$ мксек). $R=30$ см, діаметр зонда 102 мм, зонд на осі свердловини

Відповідно до даних, наведених на рис. 2.2, експериментальні значення $\tau_{\text{екс}}$, визначені за правою гілкою часового спектра, становлять 500, 500 та 420 мкс для діаметрів свердловини 150, 250 і 300 мм відповідно. За аналогічних умов, коли діаметр свердловини дорівнює діаметру зонда (102-105 мм), величина $\tau_{\text{екс}}$ становить 540 мкс.

2.2.3. Вплив ексцентриситету зонда на результати досліджень. Залежність часових спектрів теплових нейтронів від положення зонда ІННК усередині свердловини подано на рисунку 2.3. Ексцентриситет зонда впливає як на абсолютні значення швидкості рахунку в різних часових інтервалах, так і на зміну нахилу кривої. Зокрема, при діаметрі свердловини $d_{\text{св}} = 300$ мм зміщення зонда на $R=30$ см від осі до стінки спричиняє збільшення швидкості рахунку на 2-3 порядки. Одночасно спостерігається зростання нахилу правої гілки кривої, що супроводжується зміною $\tau_{\text{екс}}$ від 310 до 515 мкс; для порівняння, в однорідному середовищі за тих самих умов $\tau_{\text{екс}}=540$ мкс.

Зі зменшенням діаметра свердловини вплив ексцентриситету зонда помітно слабшає. Наприклад, при ($d_{\text{св}} = 150$) мм у тих самих умовах, що й у попередньому прикладі, швидкість рахунку при переміщенні зонда до центру знижується лише у 2–3 рази, а значення ($\tau_{\text{екс}}$) практично не змінюється в залежності від положення зонда і становить 490–500 мкс.

Таким чином, ексцентриситет зонда суттєво впливає на покази ІННК, особливо за великого діаметра свердловини. Чутливість до свердловинних умов зменшується, а точність результатів ІННК підвищується в разі притиснення зонда до стінки свердловини.

2.2.4. Вплив рідини, яка заповнює свердловину на результати вимірювання методом ІННК. Заповнення свердловини прісною водою ($\tau_1=205$ мкс) або мінералізованою водою ($\tau_1 = 50$ мкс) істотно впливає на нестационарне поле теплових нейтронів. Насамперед змінюється абсолютне значення швидкості рахунку. Так, при розміщенні зонда на відстані $R = 50$ см від осі до стінки свердловини швидкість рахунку зменшується приблизно удвічі, якщо свердловина заповнена мінералізованою водою порівняно з прісною. Це співвідношення зберігається для свердловин різного діаметра (150-300 мм).

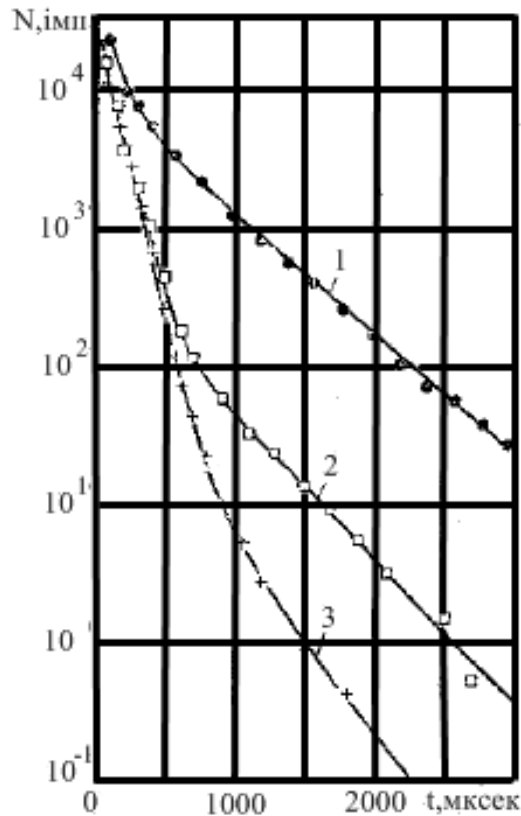


Рисунок 2.3 – Вплив ексцентриситету зонда ІННК.

1 – зонд коло стінки свердловини; 2 – зонд зміщений відносно осі свердловини; 3 – зонд на осі свердловини. $d_c=300$ мм ($\tau_1=50$ мксек), $d_s=102$ мм, $R=30$ см, пласт пісковика ($\tau_2=600$ мксек):

Нахил прямих гілок часових спектрів практично не залежить від типу рідини у свердловині за умов ексцентричного розміщення зонда. До таких висновків дійшли на основі вимірювань нейтронного поля зондами довжиною 30 і 50 см у свердловинах діаметром до 300 мм.

У випадку встановлення зонда ІННК на осі свердловини, коли вплив свердловинного простору максимальний, експериментальне значення ($\tau_{екс}$) залежить від параметрів рідини, якою заповнена свердловина: воно тим ближче до τ_2 пласта, чим меншою є різниця між τ_1 та τ_2 . Наприклад, при $R = 30$ см, $d_{св} = 250$ мм (діаметр зонда 102 мм) та $\tau_2 = 600$ мкс отримано:

- $\tau_{екс} = 500$ мкс для прісної води ($\tau_1 = 105$ мкс),
- $\tau_{екс} = 390$ мкс для мінералізованої води ($\tau_1 = 50$ мкс).

За тих самих умов при ексцентричному положенні зонда $\tau_{екс}=500-$

515 мкс.

Таким чином, при ексцентричному положенні зонда характер рідини всередині свердловини впливає насамперед на абсолютну швидкість рахунку теплових нейтронів, але практично не змінює форму часового спектра в області ($t > 500-1000$) мкс. Це твердження справджується за умови дотримання співвідношення ($\tau_1 < \tau_2$), тобто за умов слабкого поглинання нейтронів у пласті.

2.2.5 Вплив зміни складу флюїду в присвердловинній зоні на покази нейтронних методів. На результати нейтронних методів, окрім петрофізичних властивостей порід, суттєво впливають характеристики присвердловинної зони, насамперед розподіл флюїдів. Він визначається властивостями промивальної рідини, умовами розкриття пласта, параметрами колектора та фізико-хімічними характеристиками пластових флюїдів. У свердловинах, пробурених на прісному розчині, ступінь опріснення пластової води в присвердловинній зоні залежить від пористості та проникності порід і властивостей глинистої кірки. До її формування швидкість опріснення визначається залежністю між пористістю та проникністю; після утворення кірки приплив фільтрату обмежується низькою проникністю та внутрішньою глинизацією. Непроникні низькопористі пласти зберігають реліктову мінералізовану воду, тоді як у високопористих колекторах ступінь опріснення різниться залежно від ефективності витіснення флюїду. У нафтонасичених пластах при опріснюючому проникненні фільтрат швидше заміщує пластову воду, ніж у водонасичених, що формує додатковий контраст мінералізації між проникними та непроникними зонами. Хоча проникнення фільтрату знижує ефективність дослідження колекторів у відкритому стовбурі, після обсадки та тампонажу відбувається часткове відновлення початкового насичення. Нейтронні методи за колоною дозволяють реєструвати процес розформування зони проникнення та оцінювати насичення колекторів. Мінералізація пластової води, пов'язана зі зміною пористості, суттєво впливає на результати імпульсних нейтронних

методів. Під час буріння на прісному розчині формується опріснена зона, тоді як при розробці родовищ можливе зворотне проникнення мінералізованої води внаслідок обводнення або тривалої зупинки свердловини.

Вплив зони проникнення на покази ІННК зумовлений співвідношенням параметрів $\tau_{пл}$ та $\tau_{зп}$:

I. Випадок $\tau_{зп} < \tau_{пл}$. Пласт із зоною проникнення можна подати як двошарову модель із радіусом проникнення $r_{зп}$. Залежність декременту затухання $\lambda(t)$ (рис. 2.4) показує:

– без зони проникнення декремент затухання швидко зменшується при $t < 1$ мс, а далі повільно сягає значення, що відповідає пласту;

– за наявності проникнення декремент спершу відповідає параметрам зони проникнення, а при зростанні t наближається до характеристик незбуреного пласта.

Вплив зони проникнення зменшується зі збільшенням часу затримки, і починаючи з певного моменту $t = t_v$, похибка не перевищує 8 %. Глибина дослідження ІНГК за цих умов більша, ніж у ІННК. Навіть при $r_{зп} = 10$ см точна оцінка параметрів пласта можлива при $t \geq 1,5-2$ мс.

II. Випадок $\tau_{зп} > \tau_{пл}$. Він відповідає проникненню прісного фільтрату промивної рідини в пласт із мінералізованою водою. Якщо товщина зони проникнення перевищує критичну величину r_0 , то значення $\lambda(t)$ не відповідає характеристикам незміненого пласта і за ним неможливо визначити $\tau_{пл}$.

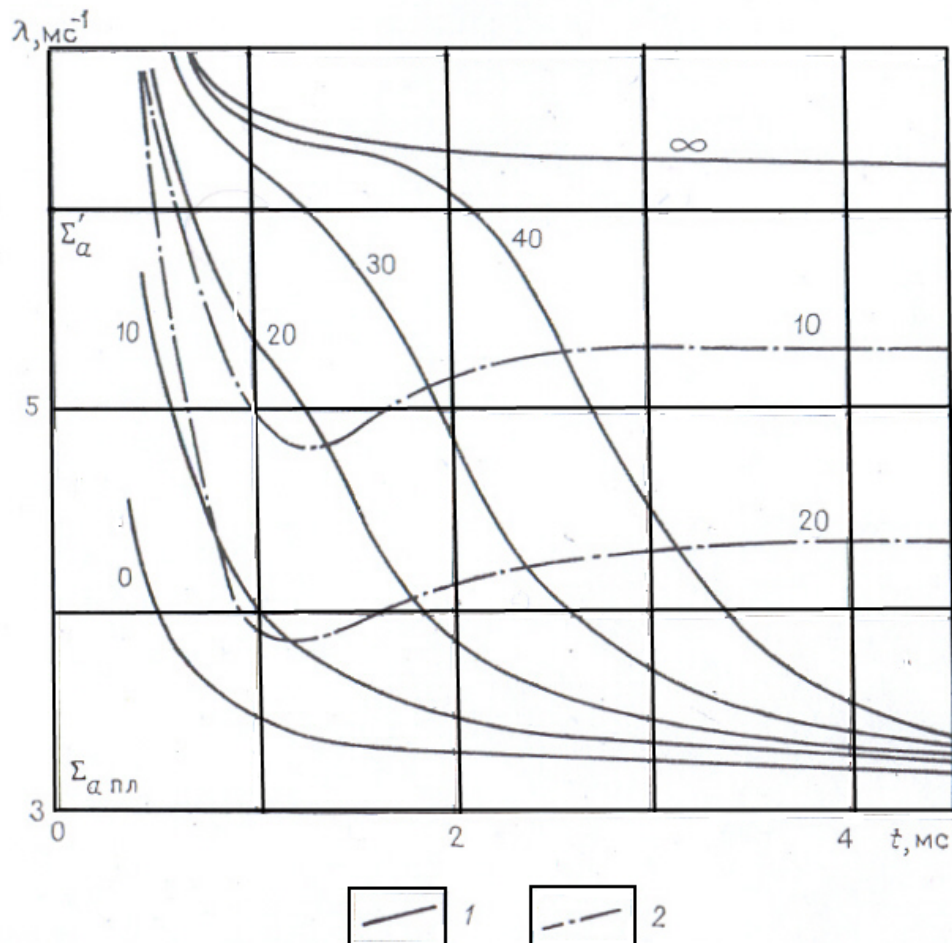


Рисунок 2.4 – Залежність асимптотичного декременту затухання від часу затримки при наявності зони проникнення: 1 – проникнення мінералізованого фільтрату в нафтонасичений пласт ($K_{пл}=0,2$, $\tau_{зп}=167$ мкс, $\tau_{пл}=333$ мкс); 2 – проникнення прісного фільтрату в пласт, що насичений мінералізованою водою ($\tau_{зп}=333$ мкс, $\tau_{пл}=167$ мкс).
Шифр кривих – товщина зони проникнення ($r_{зп}-R$)

На рис. 2.4 показано, що декремент затухання $\lambda(t)$ спершу швидко зменшується, досягає мінімуму при $t \approx 1 \div 1,5$ мс, а далі повільно зростає до асимптотичного рівня, який відповідає пласту лише при $r_{зп} \leq r_0$. У діапазоні $1 \leq t \leq 4$ мс декремент затухання чутливий до $\tau_{зп}$ та глибини проникнення, що дозволяє оцінити товщину зони проникнення та співвідношення $\tau_{зп}$ і $\tau_{пл}$.

Асимптотичний декремент не залежить від часу затримки, проте визначається розміром зонда та свердловинними умовами (діаметр, заповнення, параметри цементного кільця та зони проникнення).

Висновок

Адекватність та достовірність визначення нейтронних характеристик порід при імпульсному нейтрон-нейтронному каротажі суттєво залежать від мінералізації пластових вод, стабільності виходу 14-MeV нейтронів і якості систем моніторингу генератора. Удосконалення апаратури – насамперед генераторів і моніторингових каналів – є ключовою передумовою для переходу ІННК до рівня надійних кількісних оцінок насичення, особливо в складних геолого-фізичних умовах. Стабілізація живлення та контроль нейтронного потоку дозволяють мінімізувати інструментальні похибки і закласти основу для більш точного визначення водо-, нафто- і газонасичення порід-колекторів.

3 УДОСКОНАЛЕННЯ АПАРАТУРИ ІМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОН- НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖУ

На основі аналізу можливостей наявного апаратурного парку та з урахуванням проблем визначення нейтронних властивостей порід, розглянутих у попередньому розділі, були окреслені ключові напрями створення нового типу апаратури.

У вимірювальному блоці передбачено застосування двох зондів, що дозволяє визначати основні нейтронні параметри гірських порід. Модернізація апаратури ІННК спрямована на зменшення інструментальних похибок шляхом використання високоякісних свердловинних генераторів нейтронів і впровадження моніторингового каналу для контролю інтенсивності виходу швидких нейтронів з імпульсного генератора. Також проведено дослідження та вибрано оптимальну систему живлення свердловинної апаратури ІННК, оскільки стабільність живлення зондової частини є критично важливою для забезпечення постійної кількості нейтронів, якими опромінюється гірська порода.

3.1 Основні вимоги до апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу

Імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж ґрунтується на багаторазовій реєстрації нестационарних потоків теплових нейтронів одним або кількома зондами в свердловинах будь-якого типу. Завдяки можливості вимірювати просторово-часовий розподіл теплових нейтронів метод забезпечує високу достовірність і однозначність геофізичних інтерпретацій. ІННК належить до активних методів, оскільки інформація про геологічне середовище отримується під дією на нього імпульсного нейтронного поля високих енергій [24].

Під час проектування апаратури для проведення ІННК необхідно враховувати такі вимоги [22, 24, 25]:

- свердловинний прилад для реєстрації теплових нейтронів має бути

обладнаний двома зондами;

- апаратний комплекс повинен бути розроблений на основі напівпровідникової елементної бази;

- конструкція свердловинного приладу повинна містити канал моніторингу, який контролює інтенсивність виходу нейтронів із генератора.

Застосування двозондової системи дозволяє визначати додаткові нейтронні параметри порід, що недоступні для одно зондових модифікацій нейтронного каротажу. Використання напівпровідникових компонентів, зокрема інтегральних схем, забезпечує компактність і технологічну простоту апаратури, а також істотно зменшує її енергоспоживання.

Контроль потоку нейтронів за допомогою поширених детекторів швидких нейтронів – газонаповнених або твердотільних – є найоптимальнішим способом отримання достовірних даних про роботу імпульсного нейтронного генератора.

3.2 Вибір джерела випромінювання швидких нейтронів для проведення дослідження свердловин методом імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу

Властивості нейтронних полів визначаються не лише ядерними характеристиками речовини, але й значною мірою залежать від параметрів джерел нейтронів. Тому під час аналізу розподілу нейтронів у різних середовищах необхідно чітко уявляти тип використовуваного джерела та його властивості. Основними характеристиками нейтронних джерел є їх потужність (вихід нейтронів на одиницю часу), енергетичний спектр, період напіврозпаду та інтенсивність супутнього γ -випромінювання.

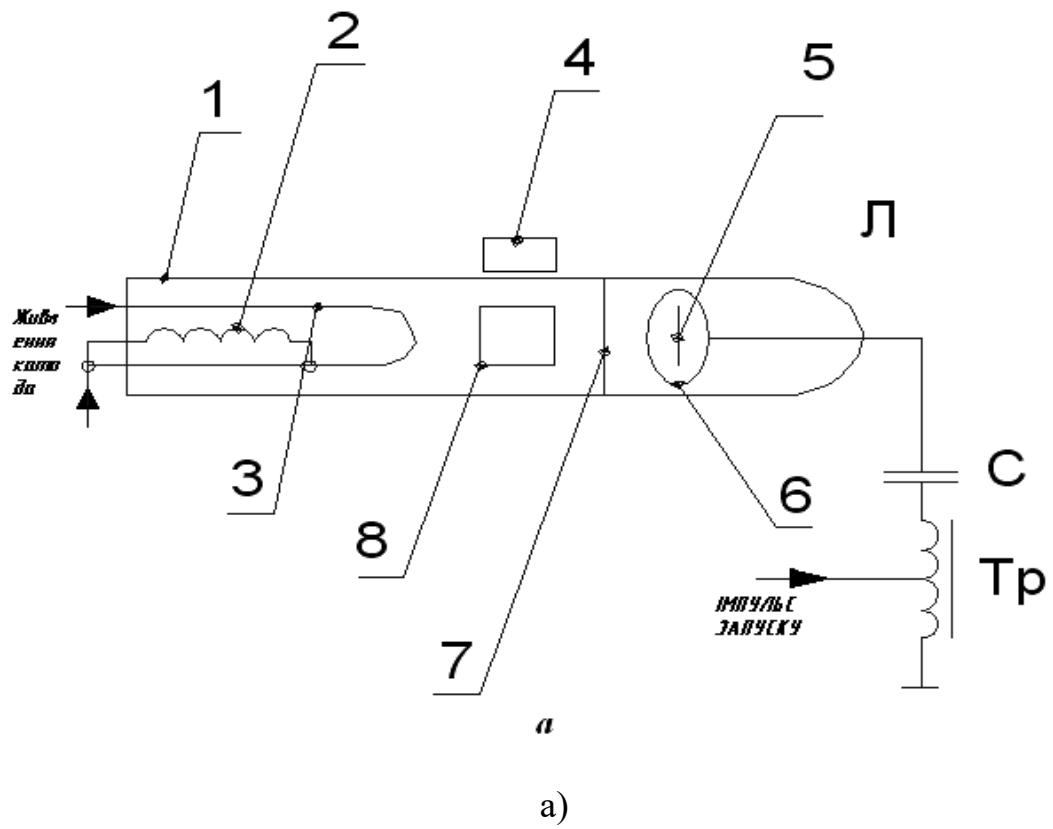
Енергетичний спектр нейтронів відіграє ключову роль у фізиці їх розповсюдження. У теоретичних розрахунках абсолютна потужність джерела не має значення, однак на практиці вона визначає величину вимірюваного сигналу та статистичну похибку. Джерела умовно поділяються на некеровані

(ізотопні) та керовані. Хоча ізотопні джерела є стаціонарними, на їх основі створювалися й керовані модифікації, наприклад модульоване Sb-Be джерело з виходом 5×10^5 нейтр./с і глибиною модуляції 70 %.

До керованих джерел належать нейтронні генератори, що працюють у стаціонарному та імпульсному режимах і випромінюють майже моноенергетичні нейтрони з енергією 14,1 МеВ. У ядерно-геофізичній апаратурі застосовують або стандартні ампульні джерела ($^{210}\text{Po-Be}$, $^{239}\text{Pu-Be}$ з енергіями до 11 МеВ), або компактні прискорювачі, що генерують 14-МеВ нейтрони у (d, t) – реакціях. Генератори на основі реакції $T(d,n)^4\text{He}$ є найперспективнішими, оскільки забезпечують значний вихід нейтронів навіть при енергіях у десятки кеВ, що спрощує вимоги до електричної міцності прискорювачів і дозволяє створювати випромінювальні блоки об'ємом до 2 дм³. Крім того, непружне розсіяння на ядрах кисню можливе при $E_n > 6,44$ МеВ і його ймовірність зростає з енергією нейтронів [21, 22].

Прискорювальна трубка (рис. 3.1, а) являє собою скляний балон із дейтерієм ^2H . Іонізація здійснюється електронами, що виникають через емісію розігрітого вольфрамового катода. Електрони прискорюються анодом та під дією магнітного поля рухаються спіральними траєкторіями. Високовольтний електрод з мішенню, насиченою тритієм, живиться синусоїдальною напругою трансформатора. Позитивні дейтрони прискорюються та, ударяючись об мішень, генерують нейтрони енергією 14 МеВ. Витрата дейтерію компенсується титан-водневим натікачем.

Завдяки високій енергії нейтронів (до 14 МеВ) і вибору часу затримки $\tau_s = 1000-12000$ мкс, радіус дослідження ІННК (60-80 см) значно перевищує глибинність нейтронних методів, що використовують ампульні джерела [21].



а) – структурна схема (1 – скляний балон; 2 – натікач; 3 – катод; 4 – котушка; 5 – титано-тритієва мішень; 6 – анод; 7 – діафрагма; 8 – джерело іонів) б) – зовнішній вигляд

Рисунок 3.1 – Імпульсна нейтронна трубка

Вплив таких факторів, як положення приладу в осі свердловини, обсадна колона, цементне кільце чи зона проникнення фільтрату, на густину теплових нейтронів в ІННК загалом підпорядковується тим самим закономірностям, що й у стандартному ННМ-Т. Однак за достатньо великих часів затримки свердловинні умови практично не впливають на часовий розподіл теплових нейтронів. Оскільки імпульси джерела повторюються дуже часто (10-400 разів на секунду), ІННК реєструє інтенсивність теплових нейтронів для заданого часу затримки, усереднену за значною кількістю імпульсів.

Генератор нейтронів має відповідати додатковим вимогам:

- стабільність виходу нейтронів не менше 90%;
- ресурс роботи при температурах понад 80 °С – не менше 200 годин.

Стендові дослідження перших макетів генератора ІНГ-06 показали, що час «розпалювання» нейтронної трубки між різними зразками може відрізнятись до 50 % (рис. 3.2). Генератор може працювати в безперервному та імпульсному режимах. Імпульсний режим забезпечується подачею позитивного потенціалу: на анод надходить прямокутний імпульс необхідної тривалості від спеціального генератора, синхронізованого з високовольтним трансформатором. Після виконання широкого комплексу свердловинних і лабораторних досліджень генератор ІНГ-06 був доведений до надійного промислового зразка, оптимізованого для задач ІННК. Нині його ресурс становить у середньому 300 годин (окремі зразки – до 500 годин) при температурах до 125 °С. [21, 22]

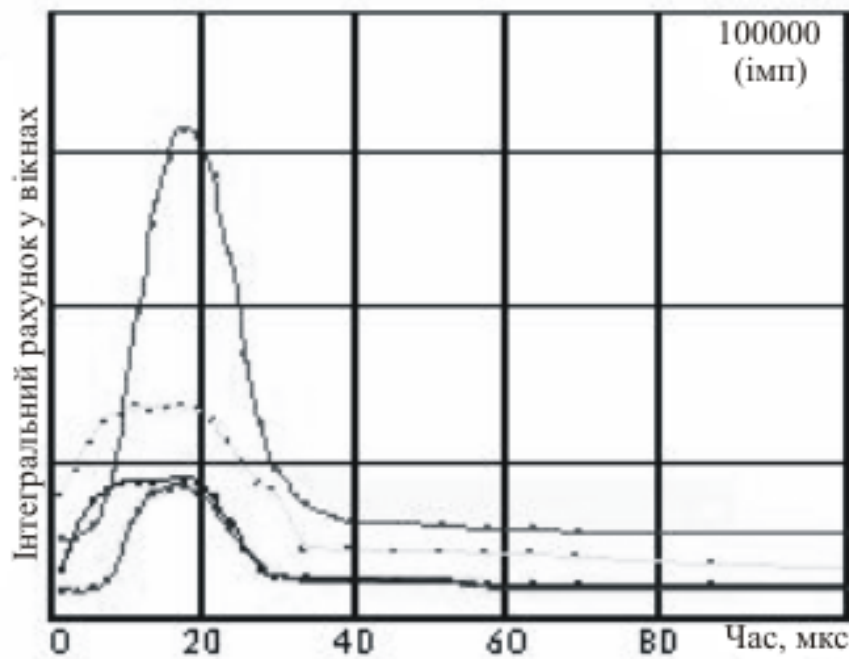


Рисунок 3.2 – Часові спектри для різних нейтронних генераторів, час накопичення 10 с, частота роботи генераторів – 10 кГц

3.3. Вибір детектора теплових нейтронів

Як детектор нейтронного випромінювання застосовується газорозрядний перетворювач. Серед різноманітних типів детекторів, що ґрунтуються на різних фізичних принципах, у геофізичній апаратурі найчастіше використовують саме ті, які працюють на основі іонізації газу під дією ядерного випромінювання або люмінесценції речовин, збуджених цим випромінюванням. У газорозрядному детекторі енергія ядерного випромінювання безпосередньо перетворюється на електричні імпульси. Конструктивно такий перетворювач (рис. 3.3) являє собою циліндричний скляний балон 1, всередині якого розташовано два електроди: тонкий металевий дріт 2, встановлений по осі й виконуючий роль анода, та металевий циліндр 3 (або металізована внутрішня поверхня оболонки), який є катодом. У деяких модифікаціях корпус детектора повністю металевий та слугує катодом. Балон заповнено газом під низьким тиском (близько $1,33 \cdot 10^4$ Па) [22, 24].

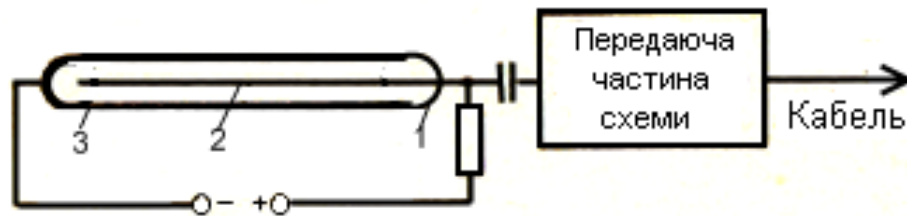


Рисунок 3.3 – Будова газорозрядного перетворювача

Газорозрядні детектори відрізняються механізмом переносу іонів в електричному полі електродів. На рисунку 3.4 показана вольт-амперна характеристика перетворювача – залежність імпульсу струму I , який виникає при його роботі від напруги U на електродах. Спочатку при малих напругах на електродах величина струму S збільшується пропорційно напрузі U – так звана омічна область роботи (I). Починаючи з деякого значення напруги U_n , струм досягає насичення і не змінюється при подальшому рості U в значному інтервалі напруги. Це пов'язано з тим, що при малих напругах не всі іони, які утворилися під дією ядерного випромінювання досягають електродів. Частина їх, зіштовхується з іонами протилежного знаку, рекомбінує. Величина іонізаційного струму в інтервалі напруг $U_n - U_n$ визначається тільки кількістю іонів, які утворилися за одиницю часу. Перетворювачі, які працюють в цій області (II), називаються іонізаційні камери. При подальшому збільшенні напруги на електродах ($U > U_n$), незважаючи на постійність початкової іонізації, спостерігається ріст струму в імпульсі. Це пов'язано з виникненням ударної іонізації, при якій електрони, які утворилися при першопочатковій дії реакції, сильно прискорюються електричним полем і іонізують молекули газового наповнювача. При цьому досягається значне підсилення іонізаційного струму. Відношення числа іонів, які досягли анода перетворювача до числа первинних іонів, які створені іонізуючою частинкою, називається коефіцієнтом газового підсилення. Його величина залежить від прикладеної напруги і може досягати 10^7 [21, 22].

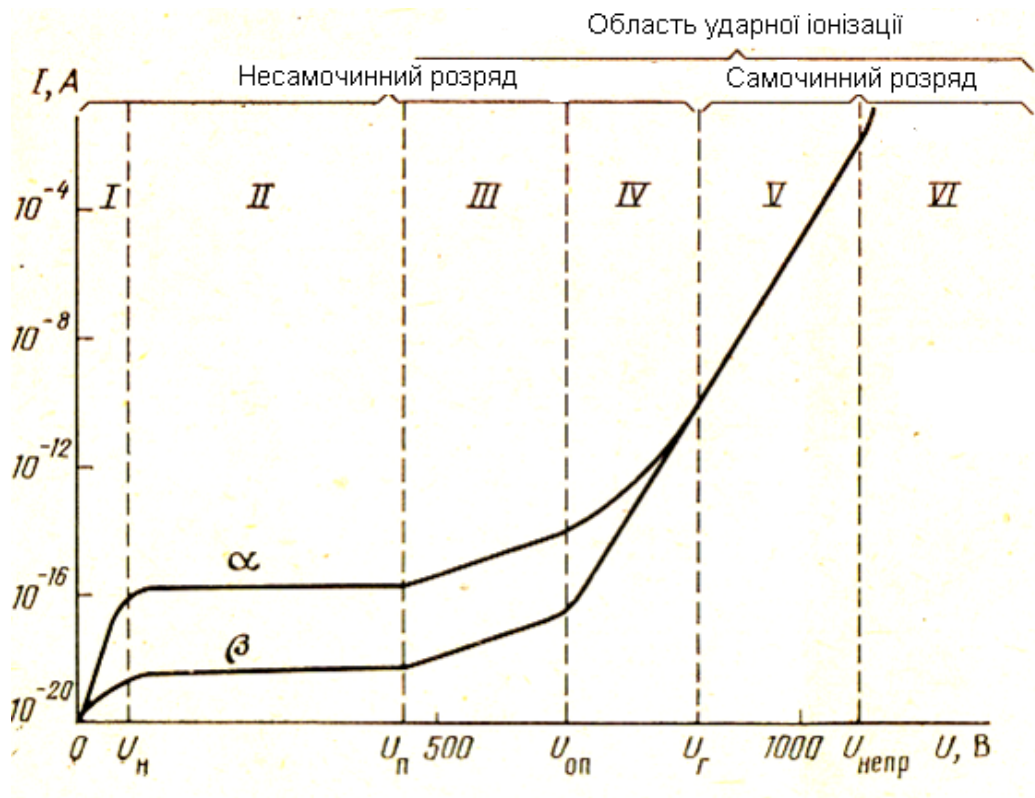


Рисунок 3.4 – Вольт-амперна характеристика газорозрядного перетворювача

Після появи ударної іонізації спочатку спостерігається пропорційна залежність між амплітудою вихідного імпульсу та напругою U на електродах, а також іонізувальною здатністю частинок. Цю зону називають областю пропорційності (III); вона характеризується помірним газовим підсиленням (до кількох тисяч). Подальше зростання напруги призводить до області обмеженої пропорційності (IV), де відповідність між імпульсом і первинною іонізацією порушується. Далі йде область Гейгера (V), у якій амплітуда імпульсу вже не залежить від початкової іонізації, а коефіцієнт газового підсилення досягає 10^8 - 10^9 і зростає зі збільшенням напруги.

За областю Гейгера розташована область безперервного розряду (VI), де для появи струму достатньо прикласти напругу, вищу за $U_{\text{непр}}$; розряд виникає самочинно. І область Гейгера, і безперервний розряд належать до самочинних, на відміну від несамочинних, які потребують зовнішнього іонізатора.

Пропорційні газорозрядні перетворювачі, заповнені трифтористим

бором, застосовують переважно для реєстрації теплових нейтронів: бор захоплює нейтрон і утворює α -частинку, яка й іонізує газ. Для реєстрації нейтронів надтеплових енергій перетворювачі оточують водневмісним матеріалом (парафін, поліетилен), а зовні покривають тонким шаром кадмію (0,5 мм), що поглинає теплові нейтрони та пропускає лише надтеплові. Уповільнені в шарі-сповільнювачі нейтрони далі реєструються детектором.

У газорозрядних детекторах газовий розряд підсилює іонізаційний струм, забезпечуючи високу чутливість та можливість реєстрації майже кожного нейтрона. Проте після кожного імпульсу детектор певний час не здатний реагувати на нові частинки (мертвий час, $\sim 10^{-4}$ с) або формує імпульс з меншою амплітудою (час відновлення). Ці параметри визначають ефективність і роздільну здатність газорозрядного перетворювача.

Роздільною здатністю називають кількість іонізуючих частинок N_{\max} , які впевнено відмічаються перетворювачем за одиницю часу. Цей параметр пов'язаний з мертвим часом τ_m і часом відновлення τ_v співвідношенням:

$$N_{\max} = \frac{1}{\tau_m + \tau_a}. \quad (3.1)$$

Роздільна здатність може бути також визначена як мінімальний проміжок часу між моментами проходження іонізуючих частинок, який необхідний для впевненої реєстрації останніх. В цьому випадку:

$$\tau_{\min} = \tau_m + \tau_a. \quad (3.2)$$

Під ефективністю газорозрядного перетворювача розуміють відношення числа частинок, відмічених перетворювачем до загального числа частинок, які пройшли через його об'єм. Підвищення ефективності, необхідно для підвищення точності перетворення і продуктивності досліджень, зазвичай досягається збільшенням робочої поверхні катоду,

паралельним з'єднанням газорозрядних перетворювачів. Основною робочою характеристикою газорозрядного перетворювача є його рахункова характеристика (рис. 3.5) – залежність частоти амплітуди N на виході перетворювача при постійній інтенсивності випромінювання від напруги U , прикладеної до електродів перетворювача. Ділянка ab є робочою ділянкою, яка називається плато. Чим більша протяжність плато і менший її нахил, тим кращий перетворювач. У газорозрядних перетворювачах Гейгера-Мюллера з сумішшю багатоатомних газів протяжність плато складає 250-300 В, кут нахилу плато – 5-5 % на 100 В. Галогенні газорозрядні перетворювачі (типу СГС) мають плато шириною до 200 В і великий кут нахилу – 10-15 % на 100 В [21].

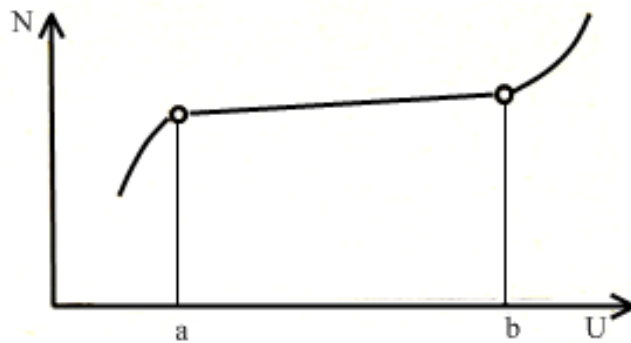


Рисунок 3.5 – Рахункова характеристика газорозрядного перетворювача Гейгера-Мюллера

До недоліків газорозрядних перетворювачів відносяться [21]:

- невисока ефективність рахунку (від долів одиниць до декількох відсотків у перетворювачів Гейгера-Мюллера, до 10 % у пропорційних перетворювачів) і мала роздільна здатність;

- постійність амплітуди вихідних імпульсів незалежно від енергії нейтронів – для перетворювачів Гейгера-Мюллера, що не дозволяє використовувати їх для вивчення енергетичного спектру випромінювання;

- обмежений строк служби – для перетворювачів Гейгера-Мюллера (10^8 - 10^{10} імп.), зв'язаний з незворотнім розпадом молекул багатоатомного

наповнювача. У галогенних перетворювачів за рахунок рекомбінації молекул строк служби дещо вищий.

Водночас газорозрядні перетворювачі зберігають стабільну роботу навіть за підвищених температур – до 250-300 °С (табл. 3.1). Їх широке робоче плато зменшує вимоги до стабілізації живильної напруги, а високий рівень вихідного сигналу – амплітуда імпульсів може становити від кількох до десятків вольт – забезпечує достатню потужність таких детекторів [22].

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики нейтронних детекторів з He-3 [21]

Тип детектора	Діаметр		Довжина		Напруга запалювання коронного розряду, В	Температурний діапазон, °С	Робоча напруга, В	Ефективність до теплових нейтронів, %
	(мм)	(in.)	(мм)	(in.)				
СНМ-16	18	0,71	135	5,31	2000	-50-+150	2300	80
СНМ-17	18	0,71	228	8,98	2000	-50-+150	2600	80
СНМ-18	32	1,26	320	12,6	2000	-50-+150	1375	70
СНМ-18-1	32	1,26	320	12,6	1650	-40-+150	2500	70
СНМ-19	32	1,26	218	8,58	1750	-50-+60	2400	70
СНМ-56	32	1,26	140	5,51	1540	-40-+200	1800	70
СНМ-66	25,5	1,0	601	23,6	1540	-25-+100	1600	80
СНМ-66-2	25,5	1,0	1016	40	1540	-25-+100	1600	80
СНМ-66-3	25,5	1,0	1524	60	1540	-25-+100	1600	80
СНМ-67	32	1,26	276	10,8	1450	-40-+250	1700	70
СНМ-68	26	1,0	237	9,3	1450	-40-+250	1500	70
СНМ-72	32	1,26	160	6,3	1600	-40-+300	1800	70
СНМ-73	32	1,26	340	13,3	1600	-40-+300	1800	70
СНМ-76	32	1,26	1045	41,1	1600	-40-+55	1700	70
СНМ-76-1	32	1,26	1545	60,8	1600	-40-+55	1700	70
СНМ-79	50	1,96	113	3,54	1450	-40-+300	1800	70

Враховуючи характеристики детекторів (табл. 3.1), які серійно випускаються та виходячи з вимог які були поставлені, для апаратури ІННК мною був вибраний блок детектування на основі детекторів СНМ-56 для першого інформаційного каналу і СНМ-18-1 відповідно для другого інформаційного каналу та СНМ-66 для моніторингового каналу.

3.4 Вибір оптимальної системи живлення свердловинних приладів імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу

Процеси генерації нейтронів, реєстрації вторинного випромінювання, а також обробки, накопичення й передачі даних зі свердловинного приладу (СП) потребують подачі електроенергії по вантажонесучому каротажному кабелю довжиною 1,5-6 км і більше – від наземного джерела до СП.

Свердловинний прилад ІННК складається з секції імпульсного нейтронного генератора та блоку реєстрації, що забезпечує детектування теплових нейтронів, первинну обробку та двосторонній обмін інформацією з наземною апаратурою. Хоча енергоспоживання вимірювального модуля можна частково зменшити завдяки використанню малопотужних схем і сучасної елементної бази, потужність, необхідна для роботи вакуумної нейтронної трубки (приблизно 25 Вт для виходу (10^8) нейтронів/с), практично не може бути знижена і залишається основним споживачем енергії в ІННК.

Ефективність передачі та перетворення електроенергії в СП суттєво визначає такі параметри ІННК, як надійність, робочий ресурс та гранична робоча температура. Слід зазначити, що прилади ІННК, які живляться змінною напругою підвищеної частоти (400 Гц-1 кГц) і потребують багатожильних кабелів, нині вважаються застарілими та не відповідають сучасним вимогам.

Перехід на живлення СП постійною напругою та двосторонню передачу інформації через одножильний каротажний кабель із різними електричними параметрами значно спрощує інтеграцію апаратури та розширює сферу її застосування. При цьому важливо забезпечити одночасну передачу енергії й інформації. Такий принцип був покладений в основу сучасних комплексів ІННК (рис. 3.6).

У процесі розробки здійснювали вибір:

– рівня вхідної напруги;

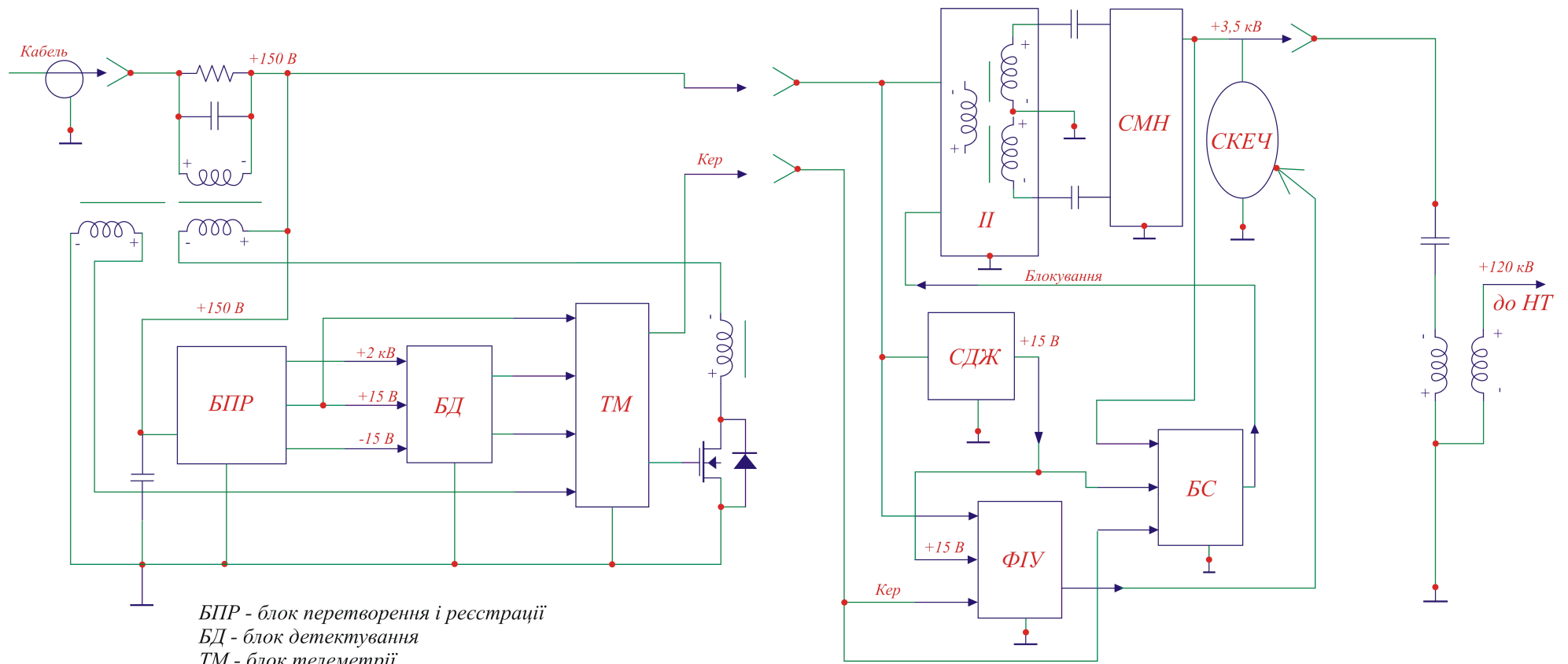
- оптимальних критеріїв для силових перетворювачів;
- структурних і принципів схем цих перетворювачів;
- елементної бази;
- робочих частот інверторів;
- напрямів подальшого удосконалення силової частини.

Усі ці параметри взаємопов'язані, і позитивний результат можливий лише при комплексному їх розгляді.

Омічний опір реальних одножильних кабелів залежить від довжини й типу та становить 20-200 Ом. Тому наземний блок живлення разом із кабелем є неідеальним джерелом напруги для СП, що споживає десятки ват. Це спричиняє такі негативні ефекти:

- зміна напруги на вході СП через нестабільне споживання струму;
- залежність роботи формувача інформаційних сигналів від типу та довжини кабелю;
- спотворення переданих імпульсів через пульсації, пов'язані з робочими частотами інверторів та імпульсним характером навантаження.

Підвищення номінальної вхідної напруги на СП природно зменшує споживаний струм, його пульсації та втрати на омичному опорі кабелю. Верхньою фізичною межею є пробивна напруга, яка для реальних каротажних кабелів становить орієнтовно 300–1500 В. Практично допустимі значення визначаються також наявністю й вартістю елементної бази, насамперед ключових елементів інверторів вхідної напруги СП. При цьому збільшення максимальної робочої напруги для комутаційних елементів «коштує» значно дорожче, ніж нарощення максимального струму за однакової потужності.



БПР - блок перетворення і ресстрації
 БД - блок детектування
 ТМ - блок телеметрії
 СДЖ - службове джерело живлення
 БС - блок стабілізації
 ФІУ - формувач імпульсів управління
 СМН - схема множення напруги
 СКЕЧ - сильноточовий частотний комутуючий пристрій
 НТ - нейтронна трубка

Рисунок 3.6 – Структурна схема системи живлення свердловинного приладу ІННК

Потужність, що розсіюється в СП, формує температурний градієнт між внутрішнім об'ємом приладу та навколишнім середовищем. Основним резервом зменшення як розсіюваної потужності, так і цього градієнта є досягнення максимально можливого ККД силових перетворювачів. Важливими є не лише загальна величина втрат, а й їх розподіл між елементами схеми та конструктивне виконання тепловідільних вузлів, оскільки утруднений теплообмін усередині СП призводить до локального перегріву. При цьому різні елементи по-різному чутливі до температури: окремі феромагнітні матеріали працездатні при 200 °С і вище, тоді як високовольтні конденсатори великої реактивної потужності та силові напівпровідникові елементи набагато критичніші до перегріву. Тому структурні та схемотехнічні рішення мають, у першу чергу, мінімізувати втрати в цих критичних компонентах.

Відомо, що зменшення втрат у ключових елементах інверторів досягається застосуванням схем, які забезпечують їх комутацію при нульовому струмі або напрузі (режим «м'якого перемикавання»). У перетворювачах із підвищеною входною напругою особливо ефективною є комутація при нульовій напрузі.

Під час вибору та проектування перетворювачів потужності апаратури ІННК розглядали й досліджували такі типи, у яких можлива реалізація м'якого перемикавання:

- перетворювачі на основі інверторів напруги (послідовні резонансні інвертори);
- перетворювачі на основі інверторів струму (паралельні резонансні інвертори);
- прямо- та зворотноходові квазірезонансні перетворювачі;
- схеми з інверторами та реактором змінного струму в первинному колі;
- мостові квазірезонансні фазозсувні інвертори.

Основну увагу доцільно зосередити на силових вузлах з

нетрадиційними, але більш ефективними схемотехнічними рішеннями.

Свердловинна апаратура ІННК має перевірену практикою конструкцію у вигляді двох функціональних блоків – випромінювача та реєстраційного модуля, розміщених в окремих герметичних кожухах і з'єднаних сполучною муфтою. Важливою відмінністю від традиційного виконання випромінювача як єдиного маслonaповненого об'єму є поділ на два нерозбірні ресурсні вузли, з'єднані високовольтним роз'ємом:

- блок трубки (БТ), заповнений маслом і такий, що містить вакуумну нейтронну трубку (НТ), увімкнену за біполярною схемою, високовольтні трансформатори та накопичувальні конденсатори;

- блок живлення і управління (БЖУ) з джерелом зарядної напруги конденсаторів БТ, високовольтним комутатором (СКЕЧ), формувачем імпульсів керування (ФІУ) та службовим джерелом живлення (СДЖ).

Таке конструктивне рішення зняло необхідність залучення до обслуговування випромінювача вузьких фахівців з високовольтної та вакуумної техніки.

Ефективність конкретних схемних рішень перетворювачів напруги істотно залежить від рівня вхідної напруги та характеру навантаження. Основним споживачем енергії в БЖУ є накопичувальні конденсатори БТ. Зарядні пристрої ємнісних накопичувачів класифікують як схеми з регульованим і нерегульованим процесом заряду, а також як пристрої з жорсткою вихідною характеристикою (струмоформуючі) та з дозаторами енергії.

Джерело зарядної напруги в БЖУ належить до класу пристроїв із нерегульованим зарядом (в інверторі випромінювача відсутні спеціальні засоби керування швидкістю заряду) та ємнісним дозуванням енергії, роль якого виконують конденсатори двотактної схеми множення напруги (СМН). Стабілізація вихідної напруги досягається відключенням інвертора за сигналом блоку стабілізації (БС) у момент досягнення зарядною напругою БТ номінального значення.

Особливістю джерела зарядної напруги є виконання інвертора як двотактного ключового синусоїдального генератора з паралельно ввімкненим резонансним контуром (інвертора струму), який працює в режимі автогенератора. За роботи на резонансній частоті з активним навантаженням і високою добротністю резонансні інвертори струму мають низку переваг:

- споживання від джерела живлення практично сталого струму, пропорційного навантаженню;
- комутація ключових елементів при нульовій напрузі;
- відсутність комутації значної реактивної потужності контуру, яка за високої добротності суттєво перевищує активну.

У зарядному пристрої БЖУ елементом паралельного коливального контуру є підвищувальний резонансний трансформатор, вихідна обмотка якого навантажена на СДЖ та накопичувальну ємність БТ (ефективно $\sim 0,15$ мкФ). У процесі заряду змінюються кути відсічення діодів СДЖ, форма напруги, поточна резонансна частота і споживаний інвертором струм. Струм і період коливань змінюються від максимуму (при спрацьовуванні комутатора й майже нульовій напрузі на конденсаторах) до мінімуму (у момент досягнення вихідною напругою БЖУ $\sim 3,5$ кВ і блокування інвертора). Режим автогенерації, попри нестационарність навантаження, забезпечує роботу інвертора на поточній резонансній частоті з збереженням зазначених переваг.

Досягнення потрібних характеристик вибраної структурної схеми зарядного пристрою потребує спеціальних конструктивних рішень (зокрема симетричної намотки резонансного трансформатора) і ретельного підбору елементів. Підвищені вимоги ставляться до тангенса кута діелектричних втрат не лише основного резонансного конденсатора, а й конденсаторів СДЖ, які в процесі заряду накопичувальної ємності БТ пропускають значну реактивну потужність. Раціональний вибір матеріалу сердечника резонансного трансформатора та робочої частоти інвертора також суттєво впливає на характеристики БЖУ. Ферит має мати низькі питомі втрати на

перемагнічування в робочому діапазоні частот і бажано негативний температурний коефіцієнт цих втрат. Обмежена швидкодія сучасних високовольтних випрямних діодів робить недоцільним підвищення робочої частоти інвертора БЖУ понад ~ 70 кГц.

Реєструюча частина апаратури потребує кількох стабілізованих живильних напруг із різними номіналами та рівнями споживання. Усі вони мають спільну точку з корпусом СП, тому гальванічна розв'язка від вхідної напруги загалом не є обов'язковою. Водночас детектори вимагають високовольтного живлення, значно більшого за вхідну напругу, а аналогові й цифрові модулі – низьковольтних напруг. З огляду на це використання безтрансформаторних імпульсних регуляторів вхідної напруги є нераціональним через надто велике співвідношення тривалості робочого такту й паузи.

Оскільки детектори споживають дуже малу потужність, але потребують високої стабільності напруги, на перший погляд логічно виконати окреме високовольтне джерело живлення. Проте у свердловинних приладах з внутрішнім діаметром близько 32 мм габарити трансформаторів обмежуються переважно товщиною ізоляції та виводів, а не передаваною потужністю, тож об'єм магнітопроводу виходить надлишковим. Так само малоефективним є отримання всіх необхідних напруг від одного трансформатора через складність розміщення великої кількості виводів та забезпечення задовільного магнітного зв'язку між численними обмотками.

Тому доцільно реалізувати блок перетворення напруги реєструючої частини на основі одного інвертора – паралельного резонансного автогенератора, подібного до застосованого в БЖУ. На його виході формуються висока напруга живлення детекторів та біполярні напруги порядку ± 15 В для живлення аналогових вузлів. Ці біполярні напруги можуть далі перетворюватися безтрансформаторними стабілізованими перетворювачами у потрібну кількість низьковольтних рівнів безпосередньо на платах телеметрії ТМ. Наявний вибір мікросхем для таких малопотужних

перетворювачів постійно розширюється, а їх реалізація в свердловинній апаратурі не має суттєвих специфічних обмежень.

Силовий елемент вихідного каскаду СП, що передає в каротажний кабель інформаційні імпульси послідовного двійкового коду ТМ, виконано у вигляді послідовно з'єднаних ключа, дроселя та первинної обмотки формувального трансформатора. Вторинна обмотка зашунтована резистором і конденсатором. Дросель разом із приведеною до первинної обмотки ємністю утворюють коливальний контур, а резистор задає затухання та форму імпульсів. Комутація ключового транзистора, за аналогією з квазірезонансними перетворювачами, здійснюється при нульовому струмі.

Виходячи з наведеного аналізу, мною запропоновано впровадження описаної системи живлення свердловинного приладу, оскільки вона забезпечує вищу стабільність і надійність роботи апаратури ІННК.

3.5 Побудови інформаційно-вимірювальної системи апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу

Аналіз сучасних іноземних модифікацій апаратури ІННК показує, що в новітніх розробках активно застосовуються двозондові прилади для імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу в нафтових і газових свердловинах. Реєстровані у свердловині нейтронні поля характеризуються швидкістю рахунку імпульсів у вузьких часових інтервалах для двох детекторів теплових нейтронів, розташованих на різних відстанях від імпульсного джерела нейтронів з енергією 14 МеВ. Частота роботи генератора становить 20 Гц.

Конструктивно апаратура складається з двох основних модулів (рис. 3.7): блоку випромінювача нейтронів і блоку реєстрації. Для усунення взаємного впливу на них подається окреме живлення.

Блок реєстрації є двозондовим пристроєм для запису кривих ІННК. Один із зондів може перемикатися: за командою з поверхні детектор

теплових нейтронів відключають і замінюють детектором гамма-квантів.

Управління приладом здійснюється передаванням по каротажному кабелю позитивних імпульсів керування, які формуються на поверхні. За запитом від комп'ютера станції відбувається запуск нейтронного генератора.

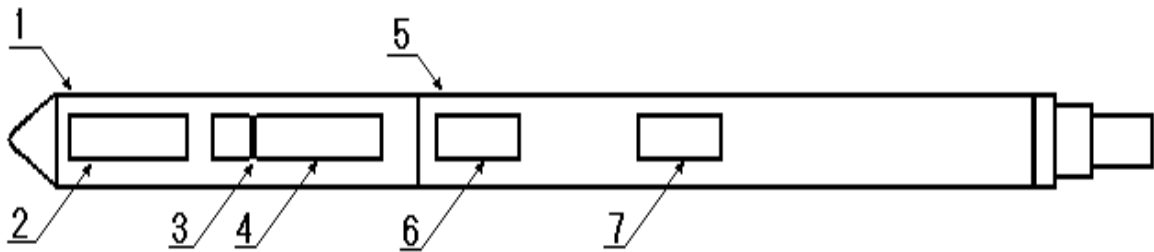


Рисунок 3.7 – Загальна структура типового свердловинного приладу ІННК

1 – блок випромінювача нейтронів; 2 – блок живлення та керування; 3 – мішень нейтронної трубки; 4 – блок нейтронної трубки; 5 – блок реєстрації; 6 – ближній детектор; 7 – дальній детектор

Свердловинний приладу включає наступні структурні елементи:

- свердловинний прилад. Прилад свердловинний імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу призначений для безпосереднього проведення досліджень в свердловинах методом ІННК за допомогою двох зондів, що дає можливість визначати додаткові нейтронні параметри гірських порід в порівнянні з однозондовими модифікаціями методу;

- лінія зв'язку. Лінія зв'язку призначена для інформаційного і механічного сполучення наземної і свердловинної частини апаратурного комплексу з метою обміну інформацією між ними. В даній модифікації використовується одноканальна лінія зв'язку, що являє собою одножилний, броньований геофізичний кабель;

- універсальна наземна консоль. Є універсальною системою обробки інформації і керування роботою свердловинної апаратури, що забезпечує роботу з багатьма видами геофізичної апаратури;

Свердловинний прилад включає два основні блоки – блок генератора нейтронів та блок електронний (рис. 3.8).

Електронний блок (БЕ) забезпечує приймання та реєстрацію сигналів по двох інформаційних каналах, контроль нейтронного потоку генератора та передавання даних на поверхню. Для виконання цих функцій блок містить такі основні вузли:

- два детекторні модулі (В1 і В2) теплових нейтронів – для першого та другого каналів, призначені для реєстрації теплових нейтронів у свердловині;
- підсилювачі-формувачі каналів (ПФ1, ПФ2), що забезпечують формування імпульсів від детекторів за амплітудою та тривалістю;
- блок реєстрації й перетворення (БРП), який здійснює перетворення часових спектрів сигналів;
- блок приймання/передачі моніторингової інформації (БПМК) для роботи з імпульсами моніторного каналу;
- блок живлення низької напруги (БЖН) для живлення малопотужних модулів;
- блок живлення високої напруги (БЖВ), що живить високовольтні вузли, зокрема детектори теплових нейтронів.

Перший та другий канали забезпечують реєстрацію й передавання імпульсів теплових нейтронів; відмінність між ними полягає лише у конструкції детекторів. Третій канал працює з монітором на основі порогового активаційного детектора.

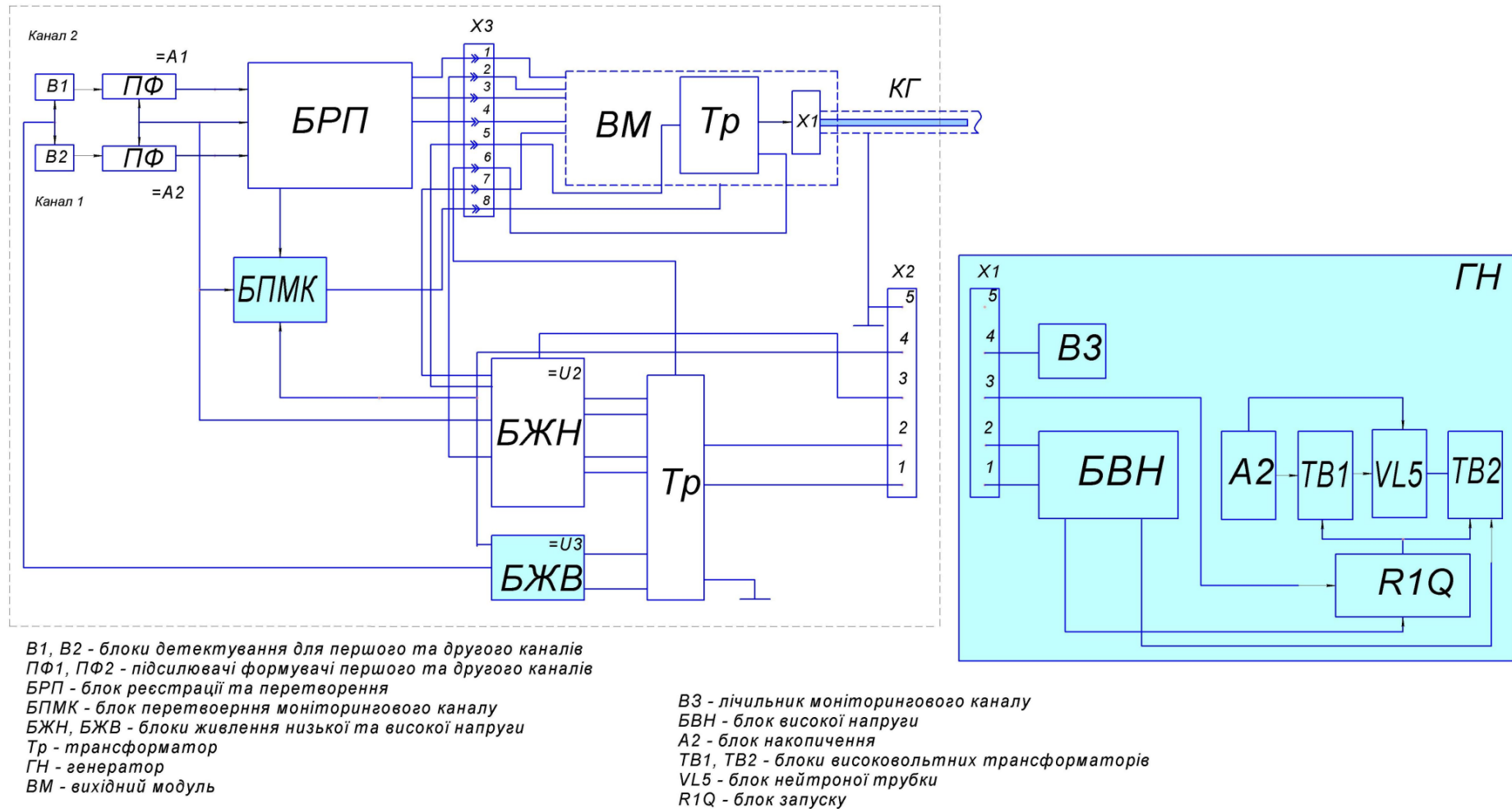


Рисунок 3.8 – Функціональна схема свердловинного приладу ІННК

Перший канал (ближній зонд) включає лічильник та підсилювач-формував із перетворювачем струм/напруга та інтегральним дискримінатором із регульованим порогом. Аналогічну будову має другий канал (далекій зонд).

Імпульси з виходів підсилювачів-формував надходять до БРП, де формуються дві послідовності імпульсів (тривалість – 8 мкс) для керування вихідним модулем (ВМ). Вихідний модуль кодує дані у вигляді однополярного біфазного коду Manchester II та передає їх по центральній жилі й оплітці кабелю на поверхню. БПМК забезпечує приймання й передавання імпульсів моніторингового каналу. Блок генератора нейтронів (ГН) формує імпульси нейтронів заданої енергії, тривалості та інтенсивності. Блок високовольтного живлення (БВН) створює постійний високовольтний струм для живлення прискорювальної нейтронної трубки.

Застосування двозондової конструкції дозволяє визначати широкий спектр нейтронних параметрів порід, недоступних при однозондових методиках. Використання напівпровідникової елементної бази та інтегральних схем забезпечує компактність апаратури й значно знижує її енергоспоживання.

3.6 Удосконалення функціональної схеми свердловинного приладу імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу

Свердловинний прилад складається з двох основних модулів – блока генератора нейтронів та електронного блока.

Електронний блок (БЕ) забезпечує реєстрацію даних у двох каналах, контроль нейтронного потоку генератора та передавання інформації на поверхню. До його складу (рис. 3.9) входять:

1. Два детекторні модулі (В1 і В2) для першого та другого каналів, призначені для реєстрації теплових нейтронів у свердловині.
2. Підсилювачі-формувачі каналів (ПФ1, ПФ2), що формують імпульси

від детекторів за амплітудою.

3. Блок реєстрації й перетворення (БРП), який виконує перетворення часових спектрів сигналів.

4. Блок приймання/передачі моніторингового каналу (БПМК).

5. Блок живлення низької напруги (БЖН) – для живлення низьковольтних вузлів.

6. Блок живлення високої напруги (БЖВ) – для живлення високовольтних модулів, зокрема детекторів теплових нейтронів.

Імпульси з підсилювачів-формуваців обох каналів надходять у БРП, де формуються дві послідовності імпульсів (тривалістю 8 мкс) для керування вихідним модулем. Вихідний модуль (ВМ) кодує дані у форматі однополярного біфазного коду Manchester II та передає їх по центральній жилі й оплётці кабелю на поверхню.

БПМК виконує приймання й передавання імпульсів моніторного каналу.

Блок генератора нейтронів (ГН). ГН генерує імпульси нейтронів заданої енергії, тривалості й інтенсивності. У його склад входять:

- блок високовольтного живлення (БВН) – створює постійний високовольтний струм для живлення прискорювальної трубки;
- нейтронна трубка (VL5) – формує потік нейтронів;
- блок накопичення (A2) – акумулює енергію для імпульсу в прискорювальній трубці та захищає БВН від перенапруг;
- блок високовольтних трансформаторів (ТВ1, ТВ2) подвоює напругу, що подається від випрямляча;
- блок запуску (R1Q) з формувачем запуску та розрядником, який створює розряд на трансформаторах у потрібні моменти часу;
- блок моніторингу (B3) – контролює стабільність потоку швидких нейтронів.

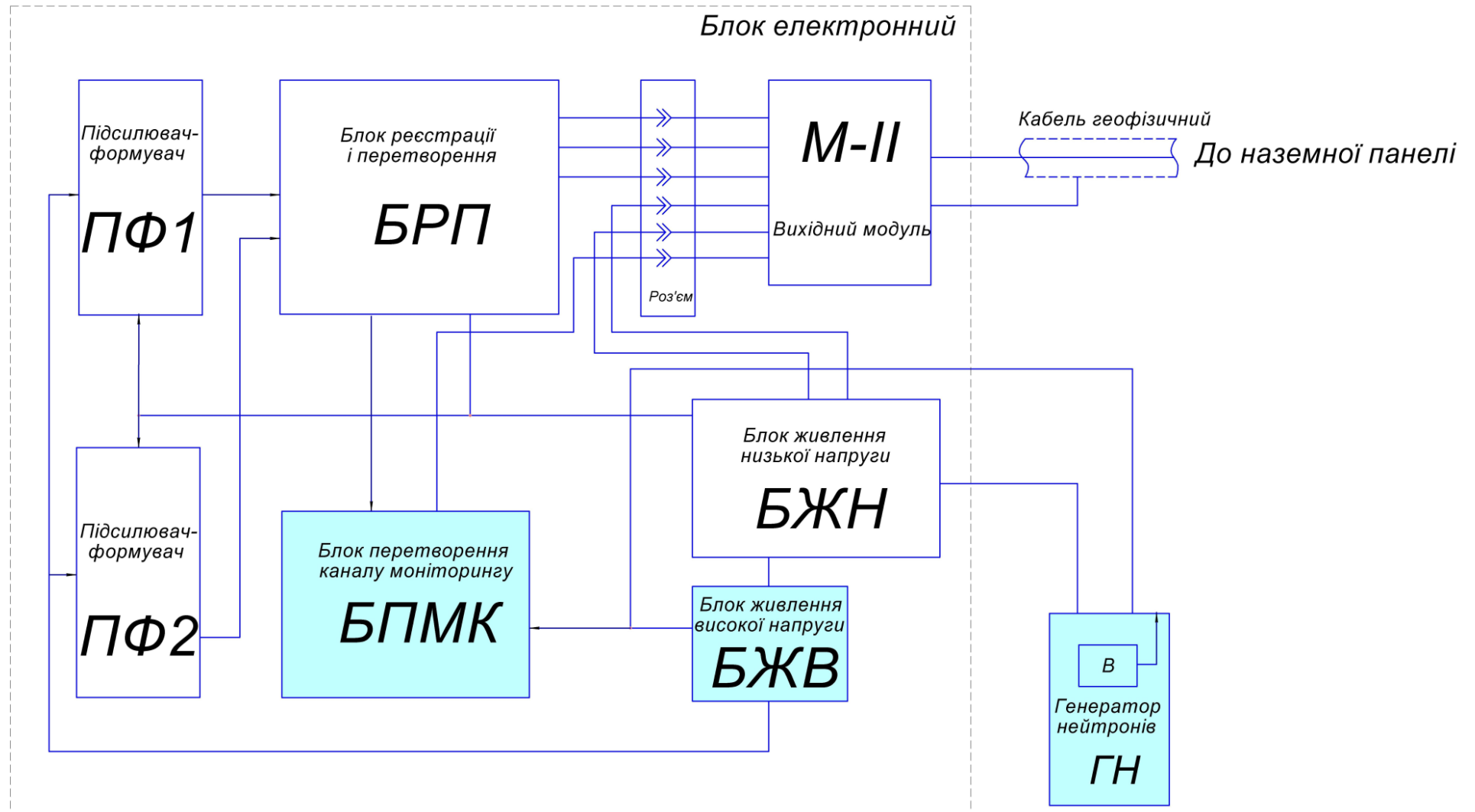


Рисунок 3.9 – Структурна схема свердловинного приладу ІННК

3.7 Удосконалення принципової електричної схеми електронного блоку свердловинного приладу імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу

Відповідно до функціональної схеми свердловинного приладу, розробленої у попередньому підрозділі, електронний блок включає два однакові канали реєстрації теплових нейтронів та окремий моніторинговий канал, кожен із власними вихідними каскадами та джерелами живлення.

Блоки детектування призначені для фіксації теплових нейтронів у свердловинному середовищі й являють собою паралельно з'єднані та об'єднані в один модуль окремі детектори. Така конструкція підвищує загальний ККД первинних вимірювальних перетворювачів.

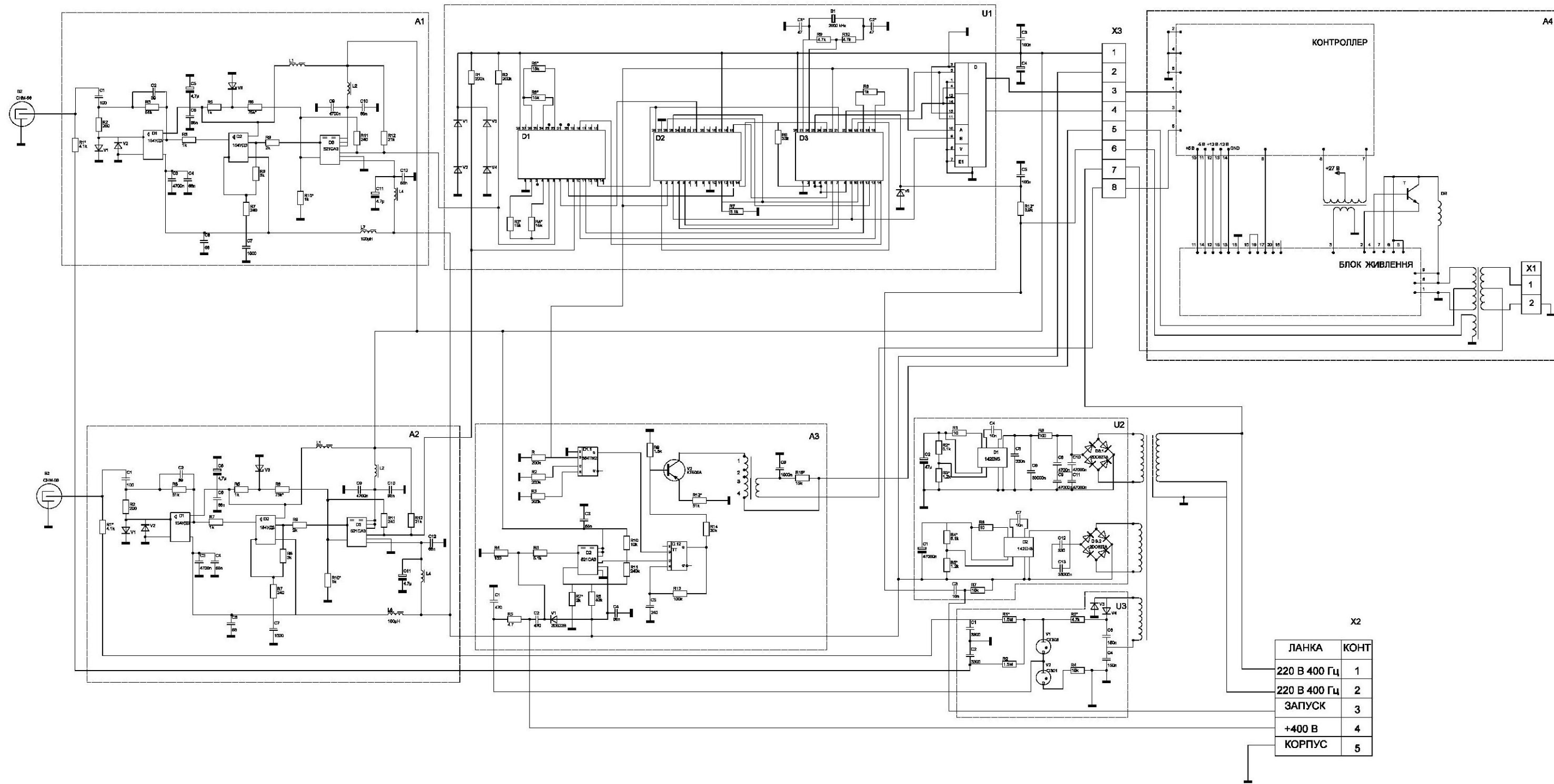
У першому інформаційному каналі застосовується газорозрядний лічильник теплових нейтронів типу СНМ-56, у другому – лічильник СНМ-18-1.

Попередні підсилювачі виконують підсилення сигналу за потужністю та формування його амплітудних і часових характеристик, тому вони реалізовані як підсилювачі-формувачі.

Підсилювачі-формувачі обох каналів побудовані за однаковою схемою (рис. 3.10; блоки А1, А2). Вони містять:

- перетворювач струм/напруга (D1);
- смуговий підсилювач (D2);
- інтегральний дискримінатор за схемою тригера Шмідта з гістерезисом (D3);
- захисний ланцюг (R2, V1, V2).

Загальний коефіцієнт перетворення визначається співвідношенням опорів резисторів R3, R7, R8, а смуга пропускання задається номіналами R7 і C7. Поріг спрацювання дискримінатора встановлюється опорною напругою V3 та дільником R6-R10..



X2	
ЛАНКА	КОНТ
220 В 400 Гц	1
220 В 400 Гц	2
ЗАПУСК	3
+400 В	4
КОРПУС	5

Рисунок 3.10 – Принципова електрична схема свердловинного приладу ІННК

Фільтрація живлення забезпечується дроселями L1-L4 і конденсаторами, а резистори R4 і R9 виконують захисну функцію.

Блок реєстрації і перетворення (БРП) призначений для зміни часового масштабу первинного сигналу. Він (U1) (рис. 3.10) побудований на основі мікропроцесора й містить:

- вузол виділення сигналів першого та другого каналів (D1);
- запам'ятовуючий модуль (D2);
- модуль керування (D3).

Імпульси надходять у БРП з виходів підсилювачів-формуваців обох каналів. У блоці формуються дві послідовності імпульсів тривалістю 8 мкс, які надалі керують роботою вихідного модуля.

Блок перетворення моніторингового каналу (БПМК) – блок А3 (рис. 3.10) – включає інтегральний дискримінатор за схемою тригера Шмідта (D2), тригер блокування (D1.1), одинібратор (D1.2) та вихідний каскад на V2. Порогове значення регулюється резистором R7, резистори R1-R3 та R6 виконують захисні функції. Блок призначений для приймання й передавання в кабель імпульсів моніторингового каналу.

Сигнали надходять від газорозрядного детектора, що забезпечує оперативний контроль інтенсивності потоку 14-MeV нейтронів, який генерує прискорювальна трубка.

Низьковольтний блок живлення (НБЖ, U2) виконаний за стандартною схемою на базі двох стабілізованих джерел. Він формує +15 В і -15 В для живлення електронних модулів приладу, зокрема блоку запуску генератора, підсилювачів-формуваців та вихідного модуля, де формується біфазний код Manchester II для передавання по кабелю на поверхню.

Блок живлення високої напруги (ВБЖ) реалізований за схемою подвоєння напруги (V3, V4, C3, C4). Баластний резистор R3* задає струм стабілітронів V1 і V2, а R4 використовується під час налаштування для контролю струму.

Конденсатори C1, C2 та резистори R1*, R2* утворюють фільтруючі

ланцюги живлення лічильників.

Блок генерує постійний струм високої напруги, необхідний для живлення прискорювальної трубки, а також забезпечує живлення газорозрядних детекторів теплових нейтронів. Робоча напруга детекторів повинна становити (1650 ± 25) В.

Робота електронного блока відбувається таким чином (рис. 3.10). На входах двох каналів реєстрації теплових нейтронів встановлені лічильники В1 – СНМ-56 (І канал, ближній зонд) та В2 – СНМ-18-1 (ІІ канал, дальній зонд). Обидва детектори живляться від високовольтного джерела ($=U_3$) стабілізованою постійною напругою (1650 ± 25) В. Імпульси, сформовані лічильниками В1 та В2, надходять відповідно до першого та другого каналів на підсилювачі-формувачі. У цих вузлах сигнали:

- підсилюються по напрузі на перетворювачі D1;
- проходять частотне формування в смуговому підсилювачі D2, який відсікає сторонні перешкоди;
- нормуються за амплітудою за допомогою інтегрального дискримінатора на D3.

Після підсилювачів-формувачів імпульси подаються у блок реєстрації і перетворення (БРП), де вони тимчасово зберігаються та проходять масштабування – часовий інтервал збільшується у 8 разів. Із БРП сигнали двох каналів по чергово надходять у вихідний модуль, у якому здійснюється їхнє кодування перед передаванням на поверхню. Процес функціонування каналу моніторингу організований так. Імпульс загального скиду встановлює тригер D1.1 у стан «0», що блокує роботу одновібратора на D1.2 (рис. 3.11). Через 10240 мкс сигнали з БРП, які надходять на входи D і C тригера D1.1, переводять його у стан «1», після чого одновібратор на D1.2 отримує дозвіл на запуск. Далі одновібратор спрацьовує імпульсами дискримінатора D2, які виникають під час реєстрації частинок детектором моніторингового каналу.

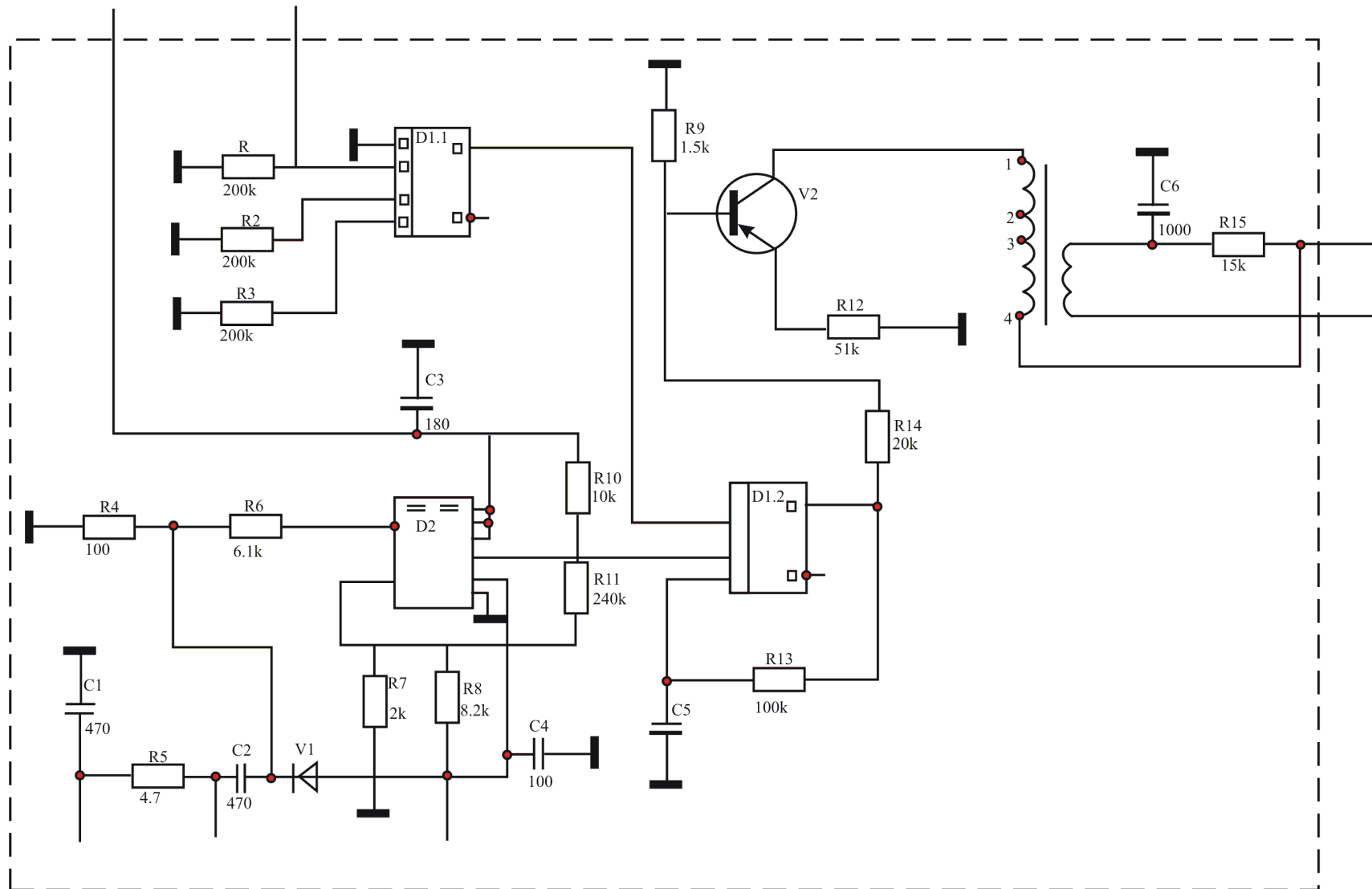


Рисунок 3.11 – Принципова електрична схема блоку перетворення моніторингового каналу апаратури ІННК

Імпульси, сформовані за тривалістю та амплітудою генератором D1.2, надходять у вихідний каскад на V2, у колекторному ланцюзі якого встановлено імпульсний трансформатор T1. Із трансформатора сигнал передається у вихідний модуль, де виконується його кодування у форматі «Манчестер II».

Ланка R15-C6 подає в центральну жилу кабелю КГ нестабілізовану постійну напругу, пропорційну змінній напрузі на головці свердловинного приладу. У наземній консолі ця напруга виділяється і може використовуватися для контролю рівня змінної напруги на приладі.

На платі БПМК також розміщено:

- фільтр C1-R5;
- розділювальний конденсатор C2;
- навантажувальний резистор R4 для лічильника моніторингового каналу типу СБМ-10, який встановлений у блоці генератора нейтронів.

Низьковольтні вузли електронного блока живляться від НБЖ. Нестабілізована позитивна напруга знімається із середнього відводу вторинної обмотки трансформатора T1 і подається на транзистори розв'язки вихідного каналу. До блока генератора нейтронів також надходить невелика постійна замикаюча напруга (-15 В) на сітку тиратрона. Живлення електронного блока з поверхні здійснюється змінним струмом 220 В, 400 Гц.

Функціонування генератора нейтронів (рис. 3.12) відбувається таким чином. Його основним елементом є імпульсна нейтронна трубка VL5. Живлення трубки здійснюється за біполярною схемою від двох трансформаторів T1 (TV1) і T1 (TV2), підключених у протифазі. На мішень трубки подається негативний високовольтний імпульс напругою близько 65 кВ, а на запалювальний електрод – аналогічний позитивний імпульс. Вторинна обмотка трансформатора T2 живить високовольтні випрямлячі, виконані за схемою подвоєння напруги на елементах VL3, VL4, C1, C2 (TV2).

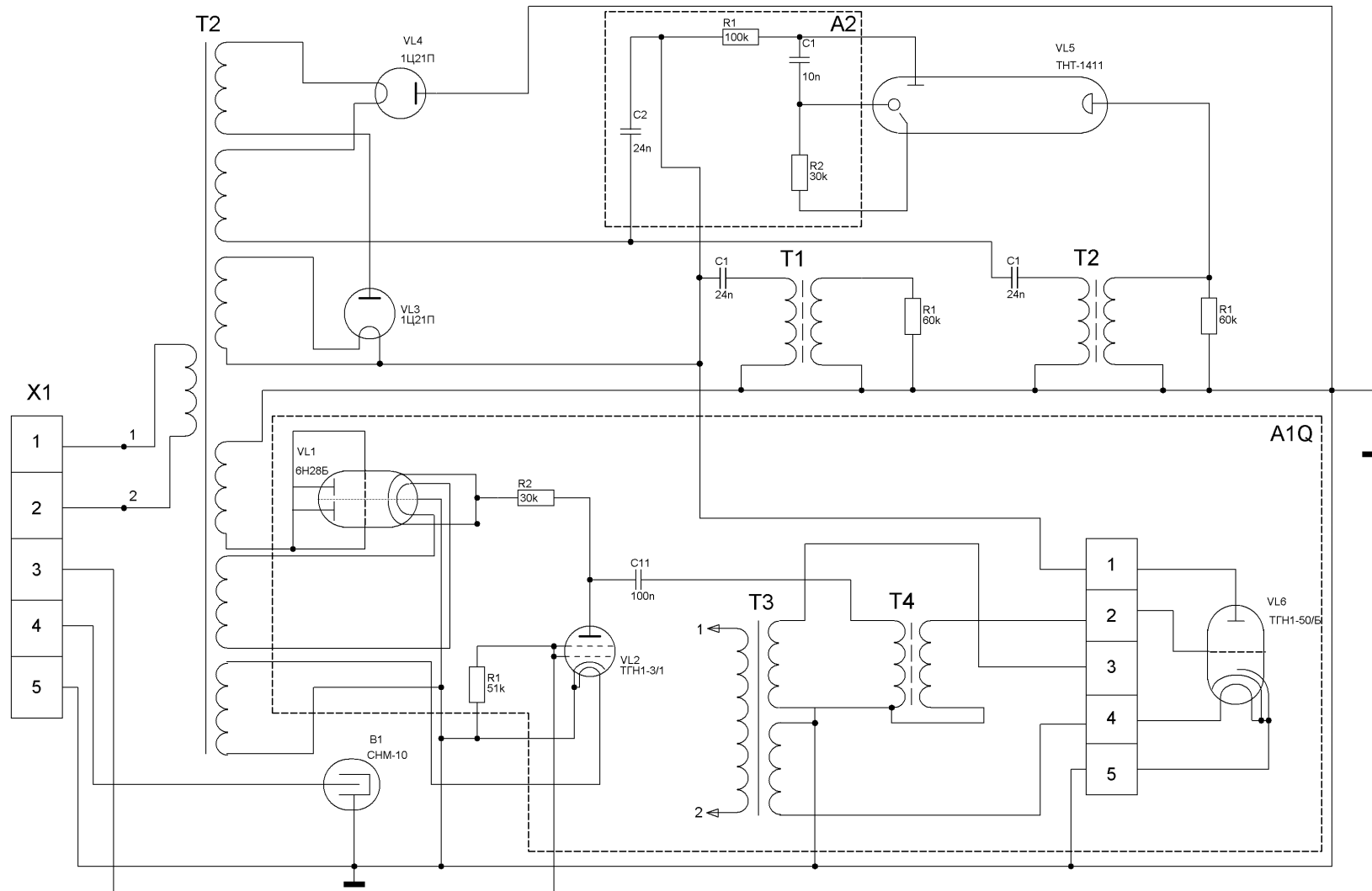


Рисунок 3.12 – Принципова електрична схема блоку генератора нейтронів

Випрямлена напруга приблизно 4,5 кВ подається на накопичувальні конденсатори C1 (TV1) і C1 (TV2). У момент пробою тиратрона VL6 відбувається розряд цих конденсаторів, а також конденсатора C2, на первинні обмотки трансформаторів T1 (TV1) і T1 (TV2). У результаті на вторинних обмотках трансформаторів формується імпульс високої напруги амплітудою близько 65 кВ. До вторинної обмотки трансформатора T1 (TV1) підключено високовольтний дільник на резисторах R1 і R2, що слугує для:

- захисту джерела живлення (T2, VL3, VL4) від зворотного високовольтного імпульсу;
- зняття з резистора R2 (A2) імпульсу «підпалу» (20-25 кВ), який подається на проміжок катод-підпал іонного джерела прискорювальної трубки VL5.

У момент пробою проміжку катод-підпал розряджається конденсатор C1 (A2), енергія якого забезпечує іонізацію плазми в іонному джерелі трубки. Іони дейтерію, прискорені полем 130 кВ, бомбардують тритієву мішень трубки VL5, унаслідок чого формується нейтронний імпульс за реакцією: $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1_0\text{n}$. Частота генерації нейтронів визначається частотою імпульсів запуску тиратрона VL6. Запуск тиратрона VL6 забезпечує схема, що включає формувач імпульсів VL1, VL2 та трансформатори T3 і T4. Анод тиратрона VL2 живиться від однопівперіодного випрямляча на VL1, який видає +250 В і заряджає конденсатор C1. Накальні ланцюги VL1 і VL2 живляться від трансформатора T2 (~6,3 В). Зміщення на сітці VL2 (~25 В) створюється схемою, розташованою в електронному блоці. На контакт 3 роз'єма X1 подаються імпульси запуску позитивної полярності та негативна напруга. Трансформатор T3 живить накал (~6,3 В) і генератор водню для тиратрона VL6. Після надходження імпульсу запуску (X1, контакт 3) тиратрон VL2 відкривається та розряджає конденсатор C1 через первинну обмотку трансформатора T4, у вторинній обмотці якого формується позитивний імпульс близько 500 В, що запускає VL6. Резистори R1 (TV1) і R1 (TV2) використовуються для захисту високовольтних кіл від пробоїв при

нестабільній роботі трубки VL5. У блоці генератора нейтронів встановлено лічильник моніторингового каналу VB1 (активаційний пороговий детектор). Живлення $+380 \pm 5$ В на нього подається через контакт 7 роз'єма Х1 з електронного блока.

3.8 Удосконалення конструкції свердловинного приладу імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу

Свердловинний прилад складається з електронного блока (3), блока генератора нейтронів (5) та компенсатора тиску (14) (рис. 3.13).

Усі вузли електронного блока розміщені в шасі, яке з одного боку закінчується головкою приладу, а з іншого – підпружиненим роз'ємом 21, що забезпечує з'єднання електронного блока з блоком генератора нейтронів. Вузли генератора нейтронів також розташовані в окремому шасі, подібному до шасі електронного блока. З одного боку це шасі з'єднується з перехідником за допомогою різьбової гайки. Усередині перехідника встановлено герметичний роз'єм, а для забезпечення рухомості поршня він з'єднаний із перехідником пружиною. Електронний блок, блок генератора та компенсатор тиску закриті захисними кожухами 2, 4, 9, а компенсатор тиску закінчується різьбовою пробкою 15. Для підвищення надійності герметизації всіх з'єднань запропоновано застосовувати гумові ущільнювальні кільця (19) у поєднанні з фторопластовими захисними прокладками (18). З протилежного боку шасі розташовано роз'єм для під'єднання високовольтного комутатора. Він притискається до роз'єму перехідника компенсатора тиску через систему фланців та пружину. Блок генератора нейтронів заповнюється маслом для зниження перегріву та забезпечення стабільності роботи.

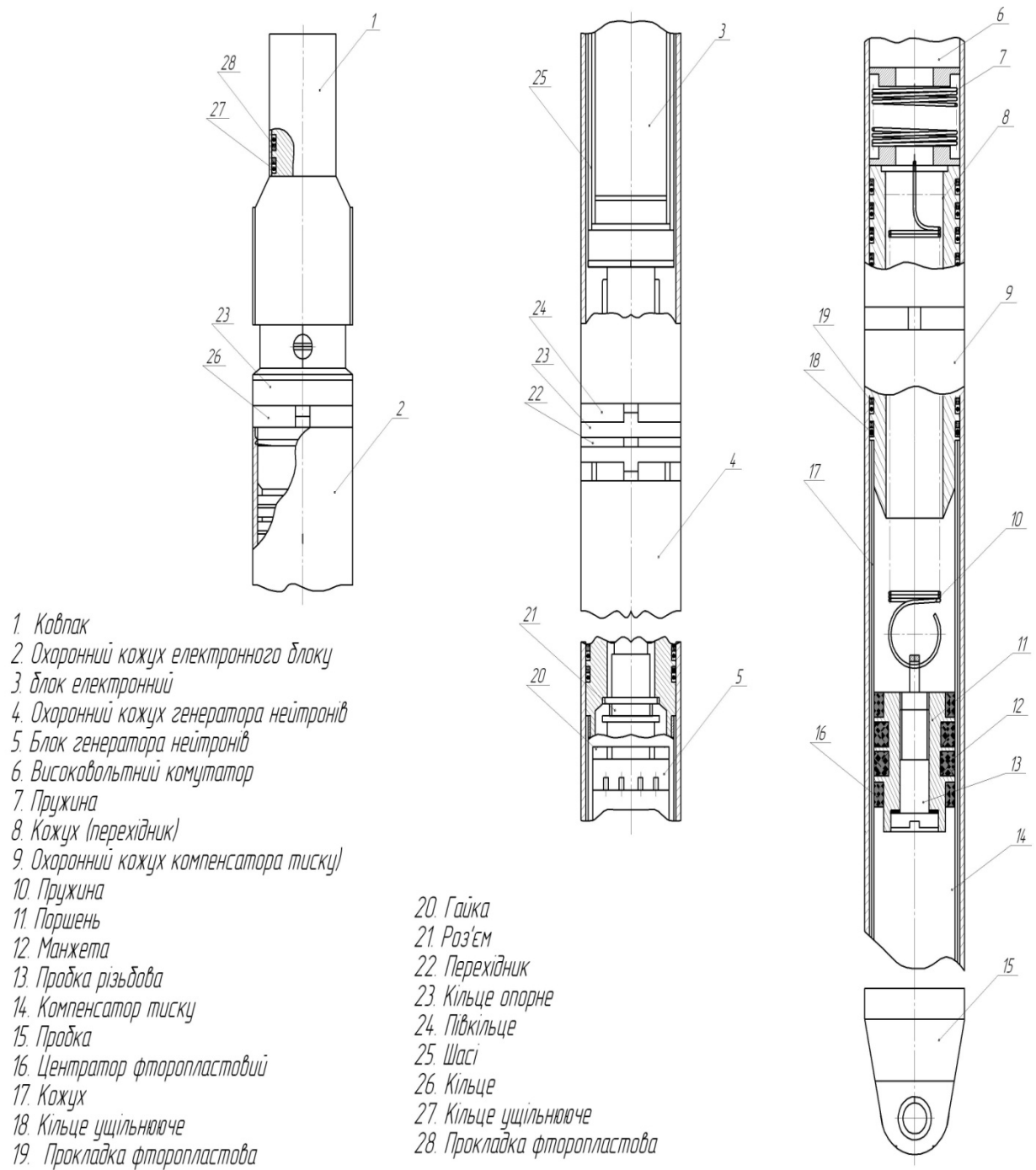


Рисунок 3.13– Конструкція свердловинного приладу

Перехідник компенсатора тиску жорстко закріплений у захисному кожусі, всередині якого переміщується поршень. Поршень має два фторопластові ущільнювальні манжети центратора. Усередині поршня

передбачено отвір для проходження масла під час встановлення його у вихідне положення після заповнення блока генератора маслом. Отвір закривається різьбовою пробкою.

Висновок

У даному розділі обґрунтовано й реалізовано комплексне удосконалення апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу, спрямоване на підвищення точності визначення нейтронних параметрів порід і стабільності роботи приладу. Запропоновано двозондову схему реєстрації теплових нейтронів, обґрунтовано вибір джерела швидких нейтронів на базі імпульсної нейтронної трубки з енергією 14 МеВ, що забезпечує збільшений радіус дослідження та необхідну статистичну достовірність вимірювань. Вибрано газорозрядні детектори типів СНМ-56, СНМ-18-1 та СНМ-66, які мають високу ефективність до теплових нейтронів і зберігають працездатність у широкому діапазоні температур.

Розроблено й оптимізовано систему живлення свердловинного приладу з живленням постійною напругою через одножильний кабель та застосуванням резонансних перетворювачів потужності й режиму «м'якого перемикавання», що зменшує втрати, теплове навантаження та підвищує ККД. Удосконалено функціональну, електричну та конструктивну схеми приладу: виділено окремі блоки випромінювача, електроніки та компенсатора тиску, реалізовано моніторинговий канал контролю потоку швидких нейтронів і телеметричну систему з передаванням даних у кодї Manchester II. Це забезпечує вищу надійність, стабільність та повторюваність результатів ІННК у складних геолого-технічних умовах.

4 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОЧНОГО ХАРАКТЕРУ НАСИЧЕННЯ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ МЕТОДОМ ІННК

4.1 Моделі, що характеризують нейтронні властивості порід-

колекторів

Моделювання нейтронних характеристик порід-колекторів нафтогазових родовищ виконується переважно для теригенних товщ, сформованих мономіктовими та поліміктовими різновидами порід. Нейтронна модель колекторів базується на параметрах, що визначаються за результатами імпульсного нейтронного каротажу безпосередньо в умовах свердловини. Нейтронні властивості гірських порід характеризують за такими основними параметрами: часом сповільнення швидких нейтронів τ_s , довжиною їх сповільнення L_s , довжиною термалізації L_{th} , довжиною дифузії теплових нейтронів L_d , часом життя теплових нейтронів τ_n та коефіцієнтом їх дифузії D . Значення цих параметрів, які відображають нейтронні властивості порід, визначаються низкою чинників: вмістом водню в поровому просторі, мінералогічним складом скелета породи (особливо за умов полімінеральності), густиною гірських порід, типом та ступенем флюїдонасичення, концентрацією хлору в пластових водах та фільтраційно-ємнісними властивостями колектора. У практиці геофізичних досліджень найважливішими параметрами, що характеризують нейтронні властивості, є час життя теплових нейтронів τ_n та коефіцієнт дифузії D . Їхні значення обчислюють за відповідною формулою [21, 22, 26]:

$$\tau_n = \left(\nu \sum_{i=1}^m N_i \sigma_{ai} \right)^{-1}; \quad (4.1)$$

де ν – швидкість руху теплових нейтронів (швидкість дорівнює $2,2 \cdot 10^5$ см/с

при $t^0 = 20$ °С, $\nu = 2,2 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{t^0 + 273}{293}}$), см/с;

t^0 – температура °С;

σ_{ai} – перетин поглинання теплових нейтронів ядрами i -го елемента, см²;

$$N_i = \frac{A\rho n_i}{M} - \text{кількість ядер } i\text{-го елемента в } 1 \text{ см}^3 \text{ сполуки};$$

A – число Авогадро, дорівнює величині $6,026 \cdot 10^{23}$ молекул в речовині масою 1гмоль;

ρ – густина речовини, кг/м³;

n_i – кількість атомів i -го елемента в молекулі сполуки;

M – молекулярна маса.

Середній час життя теплових нейтронів у мінералах, що входять до складу гірських порід, змінюється у широких межах. Найменші значення τ характерні для мінералів, які містять елементи з великим перерізом поглинання теплових нейтронів (бор, кадмій, хлор, рідкоземельні елементи, марганець, титан, залізо тощо), а найбільші – для графіту, кварцу та подібних мінералів. Для основних породоутворюючих мінералів, що формують скелет колекторів більшості нафтогазових родовищ ДДЗ, діапазон τ становить 60-1100 мкс. За результатами досліджень [26], час життя теплових нейтронів $\tau_{ск}$ у породах змінюється в межах 280-860 мкс. Для мономіктових порід (80-95 % кварцу) $\tau_{ск}$ становить 626-860 мкс, тоді як для поліміктових – 280-580 мкс. Така варіація пов'язана зі зміною частки кварцу та зростанням вмісту глинистої фракції. Поліміктові породи демонструють значний вплив мінералів мусковіту, біотиту, ортоклазу, хлориту, гетиту та інших, що суттєво змінюють $\tau_{ск}$.

Аналіз мінерального й хімічного складу свідчить, що основними елементами, які формують аномалії нейтронних параметрів, є калій і залізо. Підвищений вміст калію властивий польовим шпатам, слюдистим мінералам і цементу. Однак головним цементоутворюючим мінералом у досліджуваному розрізі є каолінит (60-80 %), який калію не містить. Тому, глинистий цемент впливатиме на нейтронні параметри лише за присутності гідрослюди або монтморилоніту. Наприклад, при складі скелета з 80 % кварцу й 20 % каолініту $\tau_{ск} = 736,1$ мкс, тоді як за заміщення цих 20 % гідрослюдою $\tau_{ск}$ зменшується до 582,1 мкс – тобто різниця суттєва. Така

мінливість $\tau_{ск}$ може впливати на визначення коефіцієнтів насичення $K_{нг}$ і $K_{нз}$, якщо її не враховувати. Коефіцієнт дифузії теплових нейтронів у мінералах змінюється в межах $(0,5-3,5) \times 10^5$ см²/с залежно від вмісту кристалізаційної та плівкової води. Для мінерального каркасу типових порід нафтогазових родовищ цей діапазон становить $(0,8-3,0) \times 10^5$ см²/с. Значна варіабельність нейтронних властивостей скелета ускладнює використання імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу для визначення коефіцієнтів насичення, що потребує технології врахування неоднорідностей $\tau_{ск}$. Тому для кожного родовища проводять детальне вивчення мінерального й літологічного складу колекторів, а величина часу життя теплових нейтронів визначається на основі мікро- і макроскопічних досліджень з урахуванням стратиграфічних особливостей розрізу. Для порід, де скелет переважно кварцовий, нейтронні характеристики визначаються властивостями цементної складової. У таких випадках час життя теплових нейтронів τ розраховують за спеціальною формулою [26, 27]:

$$\tau_{ск}^{-1} = \lambda_{ск} = \frac{\lambda_{кв}(1 - K_n - K_{зл}) + \lambda_{зл}K_{зл}}{1 - K_n}, \quad (4.2)$$

де $\lambda_{кв}$ – декремент затухання теплових нейтронів для мінералу кварцу, мкс⁻¹;

$\lambda_{зл}$ – декремент затухання теплових нейтронів для глинистих мінералів, мкс⁻¹;

$\tau_{ск}$ – час життя теплових нейтронів у скелеті, мкс;

$\lambda_{ск}$ – декремент затухання теплових нейтронів у скелеті, мкс⁻¹;

K_n – коефіцієнт пористості, д.од.;

$K_{зл}$ – коефіцієнт глинистості, д.од.

Таким чином, на основі визначених значень часу життя теплових нейтронів для окремих стратиграфічних горизонтів і продуктивних комплексів формують схему розподілу нейтронних параметрів у скелеті породи. В такому випадку нейтронна модель варіації часу життя теплових

нейтронів у породі-колекторі, насиченій флюїдом, розглядається як багатокомпонентне середовище. При цьому окремі його фази мають просторову відокремленість і описуються такою моделлю [26, 27]:

$$\tau_n^{-1} = \lambda = \sum_{i=1}^N (\lambda_i * V_i), \quad (4.3)$$

де τ – час життя теплових нейтронів, мкс;

λ – декремент затухання теплових нейтронів, мкс⁻¹;

λ_i – декремент затухання в i -ій складовій, мкс⁻¹;

V_i – об'єм окремої складової в одиниці об'єму породи, д.од.;

N_i – атомна маса i -го елемента.

Взаємозв'язок поточного коефіцієнта газонасичення із декрементом затухання теплових нейтронів описується наступною формулою [26, 27]:

$$\lambda_n = \lambda_{ск} (1 - K_n - K_{гн}) + \lambda_{гн} K_{гн} + \lambda_{в} K_n K_{в} + \lambda_{г} K_n K_{г} \quad (4.4)$$

де $\lambda_{п}$, $\lambda_{ск}$, $\lambda_{гн}$, $\lambda_{в}$, $\lambda_{г}$ – відповідно декременти затухання теплових нейтронів у пласті, мінеральному скелеті, глинистому цементі, воді і нафті чгазі, які заповнюють поровий простір,

K_n – коефіцієнт пористості, д.од.;

$K_{гн}$ – коефіцієнт глинистості, д.од.;

$K_{г}$ – коефіцієнт газонасиченості, д.од.

Дослідження показали [26], що для більшості газових і газоконденсатних родовищ ДДЗ час життя теплових нейтронів змінюється в межах від 3030 до 322 мкс, тоді як для конденсату це значення становить 263 мкс. Така різниця між τ для прісної води та газу є значною, що дозволяє з високою точністю визначати коефіцієнт насичення газонесних пластів. Разом із тим встановлено, що модель залежності декременту затухання часу життя теплових нейтронів від коефіцієнтів пористості та насиченості, подана

формулою (4.3), не завжди коректно відображає реальні умови, особливо для порід із поліміктовим скелетом. Це зумовлено наявністю нестандартних взаємозв'язків між петрофізичними параметрами, які модель не враховує, – таких як залежність між залишковою водонасиченістю та глинистістю, водонасиченістю і пористістю, газонасиченістю та водонасиченістю. Міцнозв'язана вода у породі-колекторі визначається вмістом глинистої фракції в її мінералогічному складі та ступенем політизації зерен у поліміктових колекторах. Вона описується функцією:

$$K_{вз} = f(K_{зл}, K_{зл}^{\min}), \quad (4.5)$$

де $K_{зл}$ – коефіцієнт глинистості, д.од.;

$K_{зл}^{nil}$ – коефіцієнт глинистості політизованої частки скелета породи.

Завжди виконується умова $K_{зл} + K_{зл}^{nil} = 1$.

Значення цих коефіцієнтів є індивідуальними для кожного родовища.

Скелет породи полімінеральних пісковиків щодо декременту поглинання теплових нейтронів може бути описаний виразом [26]:

$$\lambda_{ск} = \lambda_{ск}^{кв} + \lambda_{ск}^n, \quad (4.6)$$

де $\lambda_{ск}^{кв}$ – декремент затухання теплових нейтронів у скелеті з кварцовою основою, $\lambda_{ск}^n$ – декремент затухання теплових нейтронів у полімінеральній компоненті породи, який визначається розрахунковим шляхом.

Отже, для порід із поліміктовим скелетом модель зміни часу життя теплових нейтронів записується у вигляді рівняння [26]:

$$\lambda_{n2} = (\vartheta_1 \lambda_{ск}^к + \vartheta_2 \lambda_{ск}^n)(1 - K_n - (K_{зл} + K_{зл}^{nil})) + (\lambda_{зл} K_{зл} + \lambda_{зл}^{nil} K_{зл}^{nil}) + K_n (\lambda_6 K_{вз} + \lambda_6^к K_6^к) + \lambda_2 K_n K_2, \quad (4.7)$$

де $\lambda_{ск}^{пел}$ – декремент затухання теплових нейтронів у політизованій частині

скелета полімінеральної компоненті породи

ϑ_1, ϑ_2 – частка компонент;

K_{2l} – коефіцієнт глинистості, д.од.;

K_z – коефіцієнт газонасиченості, д.од.;

$\lambda_{пг}, \lambda_{ск}, \lambda_{гл}, \lambda_{в}, \lambda_{г}$ – декременти затухання теплових нейтронів відповідно у поліміктовому пласті, мінеральному скелеті, глинистому цементі, воді і газі, які заповнюють поровий простір мкс^{-1} .

4.2 Визначення поточного коефіцієнта насичення порід-колекторів методом ІННК

Сучасна апаратура нейтронного каротажа (ІГН-9, АІНК-43) забезпечує достатньо високу точність визначення нейтронних параметрів продуктивних пластів. Це досягається завдяки наявності моніторингового каналу швидких нейтронів, який контролює стабільність потоку випромінювання, а також можливості виконувати калібрувальні процедури на спеціальних макетах. Стабільність роботи приладу є ключовим фактором точності визначення нейтронних характеристик. Водночас свердловинні умови та неоднорідність нейтронних властивостей скелета порід можуть спричинити похибки під час кількісної інтерпретації імпульсного нейтронного каротажу. Залежність коефіцієнта газонасичення K_g від середнього часу життя теплових нейтронів у пласті, скелеті, воді та нафті ($\tau_{п}, \tau_{м}, \tau_{в}, \tau_{н}$) описується наступною формулою [26]:

$$K_z = \frac{\lambda_{пг} - ((\vartheta_1 \lambda_{ск}^k + \vartheta_2 \lambda_{ск}^l)(1 - K_n - (K_{2l} + K_{2l}^{nil})) + (\lambda_{2l} K_{2l} + \lambda_{2l}^{nil} K_{2l}^{nil}) + K_n (\lambda_6 K_{6з} + \lambda_6^k K_6^k))}{\lambda_z K_n}, \quad (4.8)$$

де K_z – коефіцієнт газонасиченості, д.од.;

$\lambda_{пг}, \lambda_{ск}, \lambda_{гл}, \lambda_{в}, \lambda_{г}$ – декременти затухання теплових нейтронів відповідно у нафтогазовому пласті, мінеральному скелеті, глинистому

цементі, воді і газі, які заповнюють поровий простір, мкс^{-1} ;

K_n – коефіцієнт пористості, д.од.;

K_{zl} – коефіцієнт глинистості, д.од.;

K_g – коефіцієнт водонасиченості, д.од.

Для обчислення коефіцієнта газонасичення K_g за формулою (4.13) необхідно визначити п'ять величин: τ_n , $\tau_{ск}$, τ_b , τ_g та K_n . Значення часу життя теплових нейтронів τ_g і τ_b можна отримати з високою точністю на основі аналізу хімічного складу газу та пластових вод. Коефіцієнт пористості потребує окремої незалежної кількісної оцінки.

Аналіз нейтронної моделі (4.7) порід-колекторів показує, що параметр $\tau_{ск}$ суттєво впливає на K_g , особливо у породах із полімінеральним скелетом. Щоб урахувати неоднорідність нейтронних властивостей, необхідно використовувати просторову схему розподілу часу життя теплових нейтронів у скелеті породи. Застосування такої схеми дозволяє підвищити точність визначення поточного коефіцієнта газонасичення як для мономіктових, так і для поліміктових колекторів завдяки використанню узгоджених нейтронних параметрів скелета.

Для ілюстрації підходу розглянемо результати дослідження свердловини №73 Юліївського родовища, виконані з метою визначення поточного характеру насичення.

Свердловина №73 пробурена для оцінки газоносності і подальшої експлуатації горизонтів В-20-26, базального горизонту та зон розущільнення кристалічного фундаменту. З погляду попластової кореляції геологічний розріз добре узгоджується з даними низки свердловин, пробурених у межах цієї площі. Аналогічні горизонти верхньо- та нижньовізейських відкладів у сусідніх свердловинах дали промислові припливи вуглеводнів.

Верхньо- і нижньовізейські під'яруси карбону представлені теригенно-карбонатними породами з переважанням ущільнених інтервалів. Промислово значущі колектори виділені в горизонтах В-19, В-20 та В-25-26, де питомий електричний опір змінюється в межах від 90 до 250 Ом·м, $K_n=8-18\%$,

$K_{нт}=0,6-0,9$. В інтервалі 3565,6-3577,6 м розкрито кору вивітрювання, що не є колектором ($K_{п} = 4 \%$) (рис. 4.1).

Пласт-колектор горизонту C_{1v} №50 (3533,2-3549,4 м) досліджений до глибини 3548 м. За даними НГК верхній інтервал 3533,2-3543,0 м характеризується підвищеними значеннями $I_{ny} = 1,54-2,20$ ум. од., а за ІННК у цьому інтервалі фіксують високі значення $\tau = 500-630$ мкс. Порівняно з попереднім заміром ННК-Т (під час буріння), відмічається збільшення τ , що свідчить про поступове руйнування зони проникнення. Дані НГК при цьому залишаються стабільними. У нижньому інтервалі 3543-3548 м спостерігаються знижені значення $I_{ny}=0,7$ ум. од., зумовлені впливом флюїду в стовбурі свердловини; при цьому $\tau_{п}$ за ІННК залишається високим (≈ 500 мкс). Аналіз розташування та форми кривих термометрії свідчить, що пласт-колектор у межах перфорації (3533,2-3548 м) працює газом із конденсатом.

Отримані значення поточного коефіцієнта газонасичення добре узгоджуються з результатами електрометричних досліджень, виконаних у відкритому стовбурі.

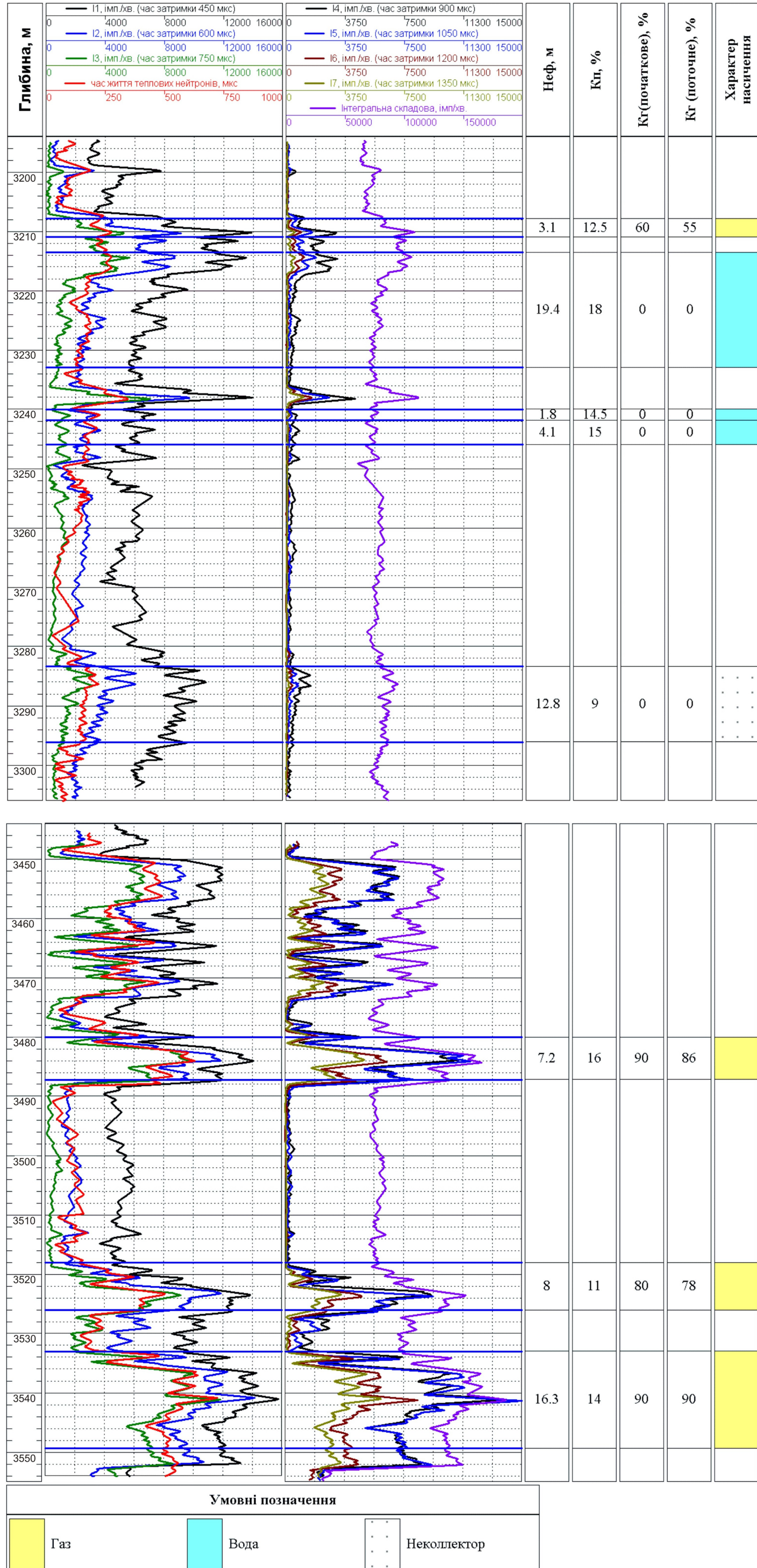


Рисунок 4.1 – Результати визначення поточного газонасичення методом ІННК

Висновок

У розділі наведено теоретичні та практичні основи визначення поточного характеру насичення порід-колекторів методом ІННК. Показано, що нейтронні параметри – передусім час життя теплових нейтронів t_n та коефіцієнт дифузії D – чутливо реагують на зміни мінерального складу, глинистості, пористості та флюїдонасичення, що робить їх інформативними для оцінки стану колекторів.

Встановлено, що значна варіабельність $\tau_{ск}$ у мономіктових і поліміктових породах потребує врахування під час інтерпретації, оскільки вона суттєво впливає на точність визначення коефіцієнтів насичення. Формування просторової моделі розподілу $\tau_{ск}$ підвищує достовірність результатів, особливо для поліміктових пісковиків.

Практичний приклад свердловини №73 Юліївського родовища підтвердив ефективність ІННК: отримані значення τ та коефіцієнтів газонасичення узгоджуються з даними електрометрії та свідчать про газоконденсатний характер насичення пласта-колектора в інтервалі глибин 3533,2-3549,4 м.

Отже, метод ІННК у поєднанні з детальним аналізом нейтронних властивостей скелета та петрофізичних параметрів є надійним засобом визначення поточного характеру насичення порід-колекторів.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження фізичних, технічних та апаратурних аспектів імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу. Встановлено, що ключовим фактором підвищення достовірності визначення характеру насичення є удосконалення генератора швидких нейтронів, системи його живлення та схеми моніторингу виходу нейтронів. Проаналізовано вплив свердловинних умов на формування нейтронного поля й показано, що зростання діаметра свердловини, ексцентриситет зонда та зміни складу флюїдів можуть суттєво змінювати часові спектри теплових нейтронів.

На основі проведених досліджень запропоновано комплекс удосконалень апаратури ІННК: оптимізація конструкції свердловинного приладу, застосування двозондової схеми, впровадження моніторингового каналу та модернізація електронного блоку. Реалізація цих технічних рішень дозволяє підвищити стабільність, чутливість і точність нейтронних вимірювань, що сприятиме більш надійному визначенню поточного характеру насичення порід-колекторів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петрокушин О. Є., Безродна І. М. Імпульсний нейтронний краотаж у світі та в Україні: початок, становлення, сучасний стан.. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія. 2025, 2(109), с. 31-39.
2. Ручко В. О., Ручко К. О. Визначення характеру насичення низькоомних резервуарів на основі даних імпульсного нейтронно-нейтронного каротажу. Мінеральні ресурси України. 2016, №2, 29-33.
3. Курганський В. М., Ручко К. О. Визначення коефіцієнта насичення нафтою низькоомних колекторів на основі нейтронних характеристик середовища: приклад Дніпровсько-Донецького басейну. Мінеральні ресурси України. 2016, №4, 47-49.
4. Федоришин Д. Д., Пятковська І.О. Комплексна інтерпретація результатів імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу та параметрів математичної статистики для підвищення видобутку газу із порід-колекторів тонкошаруватих неогенових відкладів. Івано-Франківськ. Нафтогазова енергетика, 2012, №2(18), 7-15.
5. Zhang F., Liu J., Yuan C. Monte Carlo simulation for determining gas saturation using three-detector pulsed neutron logging technology in tight gas reservoir and its application. Applied Radiation and Isotopes. 2013, 78, 51-56.
6. Arnold D. M., Schultz W. E., & Smith H. D., Jr. (1973). Pulsed Neutron Logging System (US Patent No. 3,780,302).
7. 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.
8. Fitz D. E. (2023). Evolution of Casedhole Nuclear Surveillance Logging Through Time. Petrophysics, 64(4), 473-501.
9. 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.
10. 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.

11. 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.

12. Halliburton. Reservoir Monitor Tool 3-Detector (RMT-3D). Halliburton Energy Services, 2023.

13. Schlumberger. RSTPro Reservoir Saturation Tool. Schlumberger, 2024.

14. PNNplus GmbH. Pulsed neutron tools PNN/1500. PNNplus, 2023.

15. Arbuzov A.A. et al. Memory pulsed neutron-neutron logging (MINK tool). SPE, 2012.

16. Mekic N., McIlroy C., Hill F., & Guo, W. (2016). Multidetector pulsedneutron technology for low-porosity reservoir-interpretation methodology. SPWLA 57th Annual Logging Symposium.

17. Amer M.M. et al. Efficient pulse neutron logging for uncertain water salinity in carbonate reservoirs: A case study from offshore Abu Dhabi. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference (ADIPEC). 2018, SPE-192828-MS.

18. Briesmeister J.F. MCNP – A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport. Version 3A. Los Alamos, 1987.

19. Eltaher Y.A. et al. Critical factors affecting pulsed neutron saturation interpretation. Journal of Petroleum Technology/Saudi Aramco JOT supplement, 2018.

20. Liu J. et al. A method for evaluating gas saturation with pulsed neutron logging in cased holes. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018, 59, 354-362.

21. Вижва С.А., Онищук І.І. Ядерна геофізика. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2012. 608 с.

22. Вижва С.А., Онищук В.І., Онищук І.І., Шабатура О.В. Ядерно-геофізичні методи дослідження свердловин. Київ: ВПЦ «Київський

університет», 2023. 425 с.

23. Нагорняк Р. І., Старостін В. А. Дослідження залишкового водонасичення продуктивних порід методами нейтронного каротажу. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2014. № 4. С. 103-112.

24. Федоришин Д. Д., Федорів В. В., Гаранін О. А.. Геофізичні дослідження в нафтогазових свердловинах : підручник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021. 256 с.

25. Старостін В. А., Приходько І. Я., Федак. І. О. Геофізичні методи контролю розробки нафтогазових родовищ (петрофізичні характеристики продуктивних пластів) [Текст] : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2006. 146 с.

26. Старостін Андрій Вікторович. Геофізичне моделювання з метою контролю вилучення вуглеводнів у процесі розробки продуктивних порід-колекторів складної будови (на прикладі родовищ ДДЗ) [Текст] : дис. канд. геол. наук : спец. 04.00.22 "Геофізика". Івано-Франківськ, 2009. 281 с.

27. Нагорняк Роман Ігорович. Удосконалення методів контролю обводнення нафтогазонасичених пластів за результатами геофізичних досліджень свердловин [Текст] : дис. канд. геол. наук : спец. 04.00.22 "Геофізика". Івано-Франківськ, 2014. 190 с.

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема магістерської роботи: «Удосконалення апаратури імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу з метою підвищення достовірності встановлення характеру насичення порід-колекторів».

Пояснювальна записка до магістерської роботи містить 81 сторінку.

Графічний матеріал:

1. Презентація магістерської роботи в обсязі 12 слайдів.