

М.Л. Миронцов

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,
Чоколівський б-р, 13, Київ, 03186, Україна,
+380 44 245 8797, myrontsov@ukr.net

БАГАТОЗОНДОВА АПАРАТУРА ЕЛЕКТРОМЕТРІЇ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН



Вступ. Роботу присвячено створенню апаратури електрометрії, що здатна розв'язувати актуальні завдання геофізичного дослідження нафтогазових свердловин.

Проблематика. Існуюча в Україні апаратура не спроможна надійно вирішувати завдання геофізичного дослідження нафтогазових свердловин, зокрема й в умовах Дніпровсько-Донецької западини.

Мета. Створення та свердловинне випробування відповідної апаратури високої просторової роздільної здатності.

Матеріали й методи. Для створення багатозондової апаратури електричного каротажу використано можливість поєднання потенціал-зондів, що дозволяє встановлювати електричний потенціал вздовж осі свердловини і, відповідно, дозволяє розв'язувати обернену задачу з високою точністю. Для розробки багатозондової апаратури індукційного каротажу використано метод частотного сканування.

Результати. Розроблено два прототипи багатозондової апаратури та проведено свердловинні випробування їх габаритних макетів в умовах теригенного розрізу та порівняно її ефективність з вже існуючою в Україні апаратурою.

Висновки. Пропонована апаратура електричного каротажу має вищу роздільну здатність, ніж комплекс, що складається з апаратури бокового-каротажного зондування, бокового каротажу та індукційного однозондового каротажу, також вона є простішою в експлуатації, оскільки конструктивно є одним приладом, а не трьома різними. Розроблена апаратура індукційного каротажу, має таку ж саму вертикальну просторову роздільну здатність, як і існуюча однозондова апаратура індукційного каротажу, але натомість вона дозволяє встановлювати геоелектричні параметри пластів-колекторів без залучення інших методів дослідження.

Ключові слова: електрометрія, електричний каротаж, індукційний каротаж, нафтогазова свердловина.

Окрім низки можливостей, електрометрія свердловин дає можливість встановити два ключових моменти [1, 2]: скільки вуглеводнів є у розрізі та де саме вони в ньому розташовані?

Тому вимога збільшення чи навіть збереження рівня видобутку вуглеводнів ставить на порядок денний ефективне використання електрометрії свердловин, що здатна визначати геоелектричні параметри складнопобудованих геологічних розрізів. Саме такі розрізи (тонкошаруваті, анізотропні колектори [3]; колектори аномально низького опору [4]; колектори залишкового нафтонасичення, «хибні»

колектори [5] тощо), а також похило-горизонтальні і горизонтальні свердловини притаманні сучасним умовам Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) [6].

Практичне визначення геоелектричних параметрів розрізів може відбуватися у два способи: прямим вимірюванням відповідною каротажною апаратурою та вимірюванням деяких середніх («уявних») величин, за якими у процесі розв'язання відповідної оберненої задачі встановлюються шукані значення.

Отже, при використанні другого способу розробка нового апаратурно-методичного комплексу стає ітераційним завданням: проектувана апаратура має враховувати особливості

алгоритму розв'язання оберненої задачі, а алгоритм розв'язання оберненої задачі — конструктивні, технічні й фізичні особливості апаратури [7, 8].

Оскільки у кінцевому підсумку оцінкою ефективності того чи іншого методу електрометрії є саме визначення геоелектричних параметрів розрізу [1, 2, 9], то вимога високих техніко-вимірювальних характеристик апаратури перестає бути вирішальною. Натомість головним постає питання [10]: наскільки реально досягнуті техніко-вимірювальні характеристики дозволять точно розв'язати обернену задачу? Отже, саме другий спосіб відкриває спрощений шлях виконання науково-дослідної та дослідно-конструкторських робіт конструювання апаратурної складової апаратурно-методичних комплексів електрометрії нафтогазових свердловин.

Головним об'єктом електрометричного дослідження є пласт-колектор, основною фізичною властивістю якого, з точки зору електрометрії, є зміна поздовжньої провідності (нормально до осі свердловини) [11, 12]. Якщо питомий опір (ПО) ближньої до свердловини зони відрізняється від ПО віддаленої зони, то такий пласт називають пластом з проникненням. Для його вивчення необхідно мати декілька зондів різної глибини дослідження провідності.

Широке практичне використання отримали два фізичні принципи дослідження пластів з проникненням [1, 2]: електричний каротаж (ЕК) та індукційний каротаж (ІК).

ЕК використовують у свердловинах, які заповнені провідним буровим розчином (ПО розчину $< 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) або розчином з слабкою провідністю (ПО розчину $0,5\text{--}5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). ІК використовують в свердловинах, що заповнені розчином з слабкою або взагалі відсутньою провідністю (ПО розчину $> 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) [13]. Цей поділ є досить умовним, проте саме його застосовують у галузі геофізичного дослідження свердловин.

Всі три названі типи свердловин з різним ступенем провідності притаманні умовам ДДЗ,

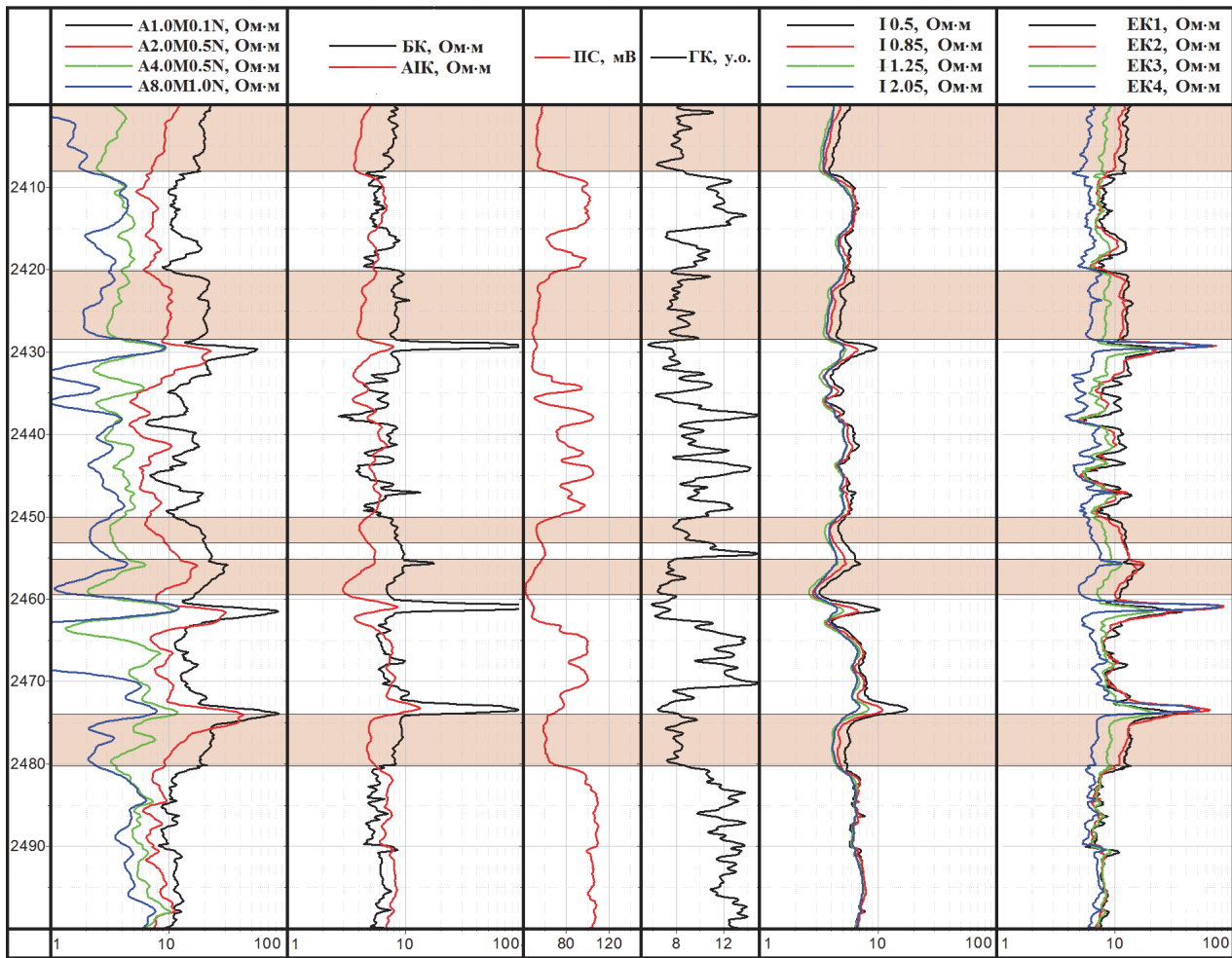
тому створення нової апаратури електрометрії передбачає незалежне створення двох різних комплексів ЕК та ІК.

Сучасні засоби електрометрії, що використовуються в Україні геофізичними компаніями різної форми власності, поділяються на три типи [14]: апаратура бокового каротажного зондування (БКЗ), що є набором потенціалта градієнт-зондів різної глибинності [15], але низької просторової роздільної здатності [1, 2]; апаратура ЕК, що складається з одного сфокусованого зонду — апаратура бокового каротажу (БК); апаратура, що складається з одного зонду ІК — так звана апаратура АІК (апаратура індукційного каротажу).

В провідних свердловинах використовуються тільки БКЗ та БК; в свердловинах з слабкою провідністю — БКЗ, БК та АІК; в умовах відсутності провідності — тільки АІК.

Проте використання комплексу БКЗ + БК + АІК має суттєві недоліки: в свердловинах, заповнених непровідним буровим розчином, можна отримати тільки один вимір ІК, який не дозволяє встановлювати факт зміни провідності вздовж пласту; в свердловинах, заповнених розчином з високою провідністю можна здійснити лише один вимір ЕК високої вертикальної роздільної здатності, а зміну провідності вздовж пласта встановлюють з низькою просторовою роздільною здатністю, тобто неможливо встановити факт зміни провідності вздовж малопотужних (так званих тонких пластів); в свердловинах з слабкою провідністю, де можуть бути використані обидва методи (ЕК і ІК) — реєструють всього два виміри високої роздільної здатності, яких також недостатньо для визначення трьох необхідних параметрів малопотужних пластів тонкошаруватого розрізу.

Це добре видно в наведеному прикладі інтервалу свердловинного розрізу (рис., ПО бурового розчину $0,9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), де на першій діаграмі наведено криві зондів БКЗ: А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, А4.0М0.5N, А8.0М1.0N, на другій діаграмі — криві БК та АІК, на третій і четвер-



Порівняння результатів різних методів електрометрії

тій – криві допоміжних методів ПС (потенціал самочинної поляризації) та ГК (гамма-картаж), які допомагають встановити пласти з проникненням. Фактично з усієї сукупності БКЗ + БК + АІК виділяються лише дві криві високої роздільної здатності – БК та АІК. Отже, існує обмеження на потужність досліджуваного пласту з проникненням: для достовірного визначення його геоелектричних параметрів потужність повинна становити більше 3–4 м. Такої просторової роздільної здатності було достатньо у середині минулого сторіччя, коли відбувалися розробки цих типів апаратури [1, 2, 13], але категорично недостатньо для сучасних умов не лише ДДЗ, але й багатьох інших

нафтогазових родовищ. Крім того, закладена допустима похибка (20 % [16]) у вимірюванні кожної складової БКЗ + БК + АІК на сьогодні потребує суттєвого зменшення.

Зважаючи на вище викладене, остаточною метою роботи стало створення багатозондової (більше трьох зондів в кожному пристрої) апаратури високої просторової роздільної здатності окремо для виконання ЕК та окремо для виконання ІК.

Теоретичну розробку таких засобів було успішно виконано в рамках конкурсу «Науково-технічні проекти наукових установ НАН України» у 2012 р. Організацією-партнером у роботі стало ПрАТ «Геофізичне обладнання Надра».

Завдання розробки багатозондової апаратури ЕК високої роздільної здатності було вирішено за допомогою можливості поєднання потенціал-зондів, що дозволяє встановлювати електричний потенціал вздовж осі свердловини [17]. Саме це й дозволяє розв'язувати обернену задачу з високою точністю [18] і тим самим встановлювати шукані геоелектричні параметри з високою просторовою роздільною здатністю (до 1 м вздовж свердловини).

Завдання розробки багатозондової апаратури ІК високої роздільної здатності було вирішено за допомогою запропонованого способу підвищення точності виміру [19], використаного у чотиризондовій апаратурі ІК [20, 21].

Протягом 2014–2017 рр. було виконано відповідні науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи та виготовлено габаритні макети кожного з цих двох типів апаратури.

Для їх одночасного польового випробування було обрано свердловину з слабкою провідністю (ПО розчину дорівнює $0,9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). На рис. наведено отримані каротажні діаграми розробленої апаратурою багатозондового ІК (криві І0.5, І0.85, І1.25, І2.05) та розробленою багатозондовою апаратурою ЕК (криві ЕК1, ЕК2, ЕК3, ЕК4). Виділені інтервали запису за глибиною відповідають інтервалам, на яких у подальшому було отримано реальний приток флюїду. Добре видно, що на кожному з цих інтервалів значення зондів кожного типу апаратури різняться, що свідчить про наявність градієнту провідності вздовж пласту і вказує на досягнення необхідної просторової роздільної здатності апаратури для зазначених умов свердловини.

Необхідно відмітити, що розроблена апаратура ЕК має вищу роздільну здатність, ніж

БКЗ + БК + АІК, також вона є простішою в експлуатації, оскільки конструктивно є одним приладом, а не трьома різними. Розроблена апаратура ІК має таку саму просторову роздільну здатність, як і зонд АІК, але дозволяє встановлювати геоелектричні параметри пластів-колекторів без залучення інших методів дослідження. Меншу роздільну здатність розробленої апаратури ІК порівняно з розробленою апаратурою ЕК у досліджуваній свердловині слід пояснювати конкретним значенням ПО бурового розчину, при якому методи ЕК є більш точними. Отже, завдання створення багатозондової апаратури високої просторової роздільної здатності електрометрії нафтогазових свердловин успішно виконано.

Проте варто констатувати, що нинішні, порівняно низькі, ціни на вуглеводні (в першу чергу нафту) та економічна криза не дозволяють вітчизняним геофізичним компаніям суттєво розширювати та оновлювати апаратурний арсенал, що негативно відбивається на виконанні науково-технічних робіт в напрямку вдосконалення геофізичного дослідження свердловин. Крім того, необхідно розуміти, що при виконанні роботи, яка залежить від безпосередньої участі комерційних структур, постійно виникають технічні труднощі на кшталт заборони розповсюдження інформації, що може містити комерційну таємницю. До такої інформації прийнято відносити й назви конкретних родовищ чи свердловин.

Робота може бути продовжена у напрямку виготовлення інших типів теоретично розроблених багатозондових пристроїв електрометрії нафтогазових свердловин [22–24] та їх натурних випробувань в різних умовах свердловин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Anderson B.I. *Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response*. Delft: Delft University Press, 2001. 377 p.
2. Миронцов Н.Л. *Численное моделирование электрометрии скважин*. Київ: Наукова думка, 2012. 224 с.
3. Миронцов Н.Л. Эффективный метод исследования сложнопостроенных анизотропных пластов-коллекторов в терригенных разрезах. *Доповіді Національної академії наук України*. 2012. № 5. С. 119–125.

4. Миронцов Н.Л. Аппаратурно-методический комплекс для исследования коллекторов аномально низкого сопротивления. *Доповіді Національної академії наук України*. 2012. № 1. С. 117–122.
5. Миронцов Н.Л. Метод распознавания «ошибочных» коллекторов и коллекторов остаточного нефтенасыщения при геофизическом исследовании скважин. *Доповіді Національної академії наук України*. 2012. № 4. С. 100–106.
6. Єгурнова М.Г., Зайковський М.Я., Заворотько Я.М., Цьоха О.Г., Кнішман О.Ш., Муляр П.М., Дем'яненко І.І. *Нафтогазоперспективні об'єкти України. Нафтогазоносність та особливості літогеофізичної будови відкладів нижнього карбону і девону Дніпровсько-Донецької западини*. Київ: Наукова думка, 2005. 196 с.
7. Миронцов Н.Л. О связи характеристик пространственного разрешения зондирующей аппаратуры каротажа и эффективности решения обратных задач. *Геофизический журнал*. 2012. Т. 34, № 3. С. 155–159.
8. Миронцов Н.Л. Метод решения обратной задачи электрометрии скважин. *Геофизический журнал*. 2012. Т. 34, № 4. С. 193–198.
9. Эпов М.И., Антонов Ю.Н. (ред.). *Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство*. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, Издательство СО РАН, 2000. 121 с.
10. Миронцов Н.Л. Анализ возможностей стандартного комплекса электрометрии для решения актуальных задач геофизического исследования скважин. *Геофизический журнал*. 2012. Т. 34, № 1. С. 159–170.
11. Миронцов Н.Л. Метод построения геоэлектрической модели пласта-коллектора по данным электрометрии скважин. *Доповіді НАН України*. 2013. № 3. С. 102–105.
12. Миронцов Н.Л. Один возможный способ повышения точности решения обратной задачи электрометрии скважин. *Доповіді НАН України*. 2013. № 4. С. 93–96.
13. Дахнов В.Н. *Электрические и магнитные методы исследования скважин*. Москва: Недра, 1967. 368 с.
14. Миронцов Н.Л. Метод повышения эффективности решения обратной задачи каротажного зондирования комплексом БКЗ-БК-ИК. *Геоинформатика*. 2011. № 2. С. 43–47.
15. Миронцов М.Л. До розрахунку коефіцієнтів зондів електричного каротажу. *Доповіді НАН України*. 2003. № 11. С. 120–122.
16. Хаматдинов Р.Т. (ред.). *Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах*. Москва, Министерство Энергетики: «ГЕРС», 2002. 270 с.
17. *Патент України № 81172*. Миронцов М.Л. Спосіб симетричного бокового багатозондового каротажного зондування.
18. Миронцов М.Л. Метод розв'язання прямої та зворотної задачі електричного каротажу. *Доповіді Національної академії наук України*. 2007. № 2. С. 128–131.
19. *Патент України № 81173*. Миронцов М.Л. Спосіб частотного сканування при індукційному каротажу.
20. Миронцов М.Л. Метод швидкого розв'язання прямої та оберненої задачі індукційного каротажу. *Геофизический журнал*. 2007. Т. 29, № 5. С. 212–214.
21. Миронцов Н.Л. Способ решения обратной 2D задачи индукционного каротажа. *Геофизический журнал*. 2009. Т. 31, № 4. С. 196–203.
22. Миронцов Н.Л. Импульсный боковой каротаж с повышенным пространственным разрешением. *Доповіді НАН України*. 2010. № 5. С. 120–122.
23. Миронцов Н.Л. Новый принцип многозондового электрического каротажа. *Доповіді НАН України*. 2010. № 6. С. 103–106.
24. Миронцов Н.Л. О методе импульсного индукционного каротажа. *Доповіді НАН України*. 2010. № 7. С. 110–112.

Стаття надійшла до редакції 22.01.18

REFERENCES

1. Anderson, B. I. (2001). *Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response*. Delft: Delft University Press.
2. Myrontsov, M. L. (2012). *Numerical modeling of electrometry in wells*. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
3. Myrontsov, M. L. (2012). Efficient investigation method for complex structures and anisotropic formations in clastic deposits. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 5, 119–125 [in Russian].
4. Myrontsov, M. L. (2012). Hardware-methodical complex for the investigation of collectors with abnormally low resistance. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 1, 117–122 [in Russian].
5. Myrontsov, M. L. (2012). Investigation method for “wrong” formations and the relict oil content under the well logging. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 4, 100–106 [in Russian].

6. Yegurnova, M. G., Zaikovskiy, M. Ya., Zavorotko, Y. M., Tsoha, O. G., Knishman, O. Sh., Mulyr, P. M., Demyanenko, I. I. (2005). *Oil and gas prospecting facilities of Ukraine. Oil gas capacity and features of lithoheophysical construction of the deposits of the lower Carboniferous and Devonian of the Dnipro-Donets Depression*. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
7. Myrontsov, M. L. (2012). On the relation of characteristics of spatial resolution of logging sounding equipment and efficiency of solving inverse problems. *Geoph. Journ. (Geophysical journal)*, 34(3), 155–159 [in Russian].
8. Myrontsov, M. L. (2012). A method of solving inverse problem of electro-logging. *Geoph. Journ. (Geophysical journal)*, 34(4), 193–198 [in Russian].
9. Epov, M. I., Antonov, Yu. N. (Eds.). (2000). *Technology of exploration of oil and gas wells based on VIKIZ. Methodical guide*. Novosibirsk: NIC OIGGM SO RAN [in Russian].
10. Myrontsov, M. L. (2012). Analysis of the capabilities of the standard electrometry complex for solving urgent problems of wells geophysical studies. *Geoph. Journ. (Geophysical journal)*, 34(1), 159–170 [in Russian].
11. Myrontsov, M. L. (2013). A method of construction of a geoelectrical model of reservoir bed by the data of borehole electrical measurements. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 3, 102–105 [in Russian].
12. Myrontsov, M. L. (2013). One possible method of accuracy increase for the solution of an inverse problem in borehole electrical measurements. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 4, 93–96 [in Russian].
13. Dahnov, V. N. (1967). *Electrical and magnetic well-logging methods*. Moscow: Nedra [in Russian].
14. Myrontsov, M. L. (2011). Method for increasing the efficiency of solving the inverse problem of logging sounding by the BKZ-BK-IR complex. *Geoinformatika (Geoinformatics)*, 2, 43–47 [in Russian].
15. Myrontsov, M. L. (2003). To calculate the coefficients of electric logs probes. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 11, 120–122 [in Ukrainian].
16. Hamatdinov, R. T. (Ed.). (2002). *Technical Instructions for Conducting Geophysical Research and Works on Cable Devices in Oil and Gas Wells*. Moscow: Ministry of energy: «GERS» [in Russian].
17. *Patent of Ukraine № 81172*. Myrontsov M. L. Method of symmetrical lateral multiprobe logging sounding [in Ukrainian].
18. Myrontsov, M. L. (2007). Method of solving the direct and reverse problem of electric logging. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 2, 128–131 [in Ukrainian].
19. *Patent of Ukraine № 81173*. Myrontsov M. L. Method of frequency scanning with induction logging [in Ukrainian].
20. Myrontsov, M. L. (2007). A quick method of solving the inverse problem of induction logging. *Geoph. Journ. (Geophysical journal)*, 29(5), 212–214 [in Ukrainian].
21. Myrontsov, M. L. (2009). Method for solving 2D inverse problem of induction logging. *Geoph. Journ. (Geophysical journal)*, 31(4), 196–203 [in Russian].
22. Myrontsov, M. L. (2010). Pulse lateral logging with high spatial resolution. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 5, 120–122 [in Russian].
23. Myrontsov, M. L. (2010). A new principle of multiprobe electric logging. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 6, 103–106 [in Russian].
24. Myrontsov, M. L. (2010). On the method of electromagnetic-pulse logging. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, 7, 110–112 [in Russian].

Received 22.01.18

Myrontsov, M.L.

Institute of Telecommunications and Global Information Space, the NAS of Ukraine,
13, Chokolivskiy Boulevard, Kyiv, 03186, Ukraine,
+380 44 245 8797, myrontsov@ukr.net

MULTI-PROBE HARDWARE FOR ELECTROMETRY OF OIL AND GAS WELLS

Introduction. The research aims at the creation of electrometry equipment capable of solving the actual problems of geophysical exploration of oil and gas wells.

Problem Statement. The existing equipment in Ukraine is not capable of reliably solving the problems of geophysical exploration of oil and gas wells in the conditions of Dnieper-Donets Basin.

Purpose. Creation and well testing of appropriate equipment with a high spatial resolution.

Materials and Methods. Combining potential probes that enable to restore the electric potential along the borehole axis and to solve the inverse problem with a high spatial resolution, a multi-probe resistivity logging tool has been created. Using the frequency scanning method, a multi-probe induction logging tool has been created.

Results. Well tests of the developed equipment in the conditions of a terrigenous cut have been carried out and its efficiency has been compared with the existing equipment in Ukraine.

Conclusion. The developed resistivity logging equipment has a higher resolution than BKZ + BK + AIK, it is also easier to operate, since it is configured as one device, instead of three separate ones. The developed induction logging equipment has the same vertical spatial resolution as the AIK probe, but enables to define the geo-electrical parameters of reservoir layers without involving other research methods.

Keywords: electrometry, resistivity logging, induction logging, and oil and gas well.

Н.Л. Миронцов

Институт телекоммуникаций и глобального
информационного пространства НАН Украины,
Чоколовский б-р, 13, Киев, 03186, Украина,
+380 44 245 8797, myrontsov@ukr.net

**МНОГОЗОНДОВАЯ АППАРАТУРА
ЭЛЕКТРОМЕТРИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН**

Введение. Работа посвящена созданию аппаратуры электрометрии, которая способна решать актуальные задачи геофизического исследования нефтегазовых скважин.

Проблематика. Существующая в Украине аппаратура не способна надежно решать задачи геофизического исследования нефтегазовых скважин в условиях Днепровско-Донецкой впадины.

Цель. Создание и скважинные испытания соответствующей аппаратуры высокого пространственного разрешения.

Материалы и методы. Используя возможность объединения потенциал-зондов, которая позволила восстанавливать электрический потенциал вдоль оси скважины и, соответственно, позволила решать обратную задачу с высоким пространственным разрешением, была создана многозондовая аппаратура электрического каротажа. Используя метод частотного сканирования создана многозондовая аппаратура индукционного каротажа.

Результаты. Выполнены скважинные испытания габаритных макетов разработанной аппаратуры в условиях терригенного разреза и проведено сравнение ее эффективности с уже существующей в Украине аппаратурой.

Выводы. Разработанная аппаратура электрического каротажа имеет более высокое пространственное разрешение, чем BKZ + BK + AIK, также она более простая в эксплуатации, поскольку конструктивно представляет собой один прибор, а не три разных. Разработанная аппаратура индукционного каротажа, имеет такое же вертикальное пространственное разрешение, как и зонд AIK, но позволяет определять геоэлектрические параметры пластов-коллекторов без привлечения дополнительных методов исследования.

Ключевые слова: электрометрия, электрический каротаж, индукционный каротаж, нефтегазовая скважина.