

**В.П. Нагорний, В.В. Кулик,
С.Т. Звольський, І.І. Денисюк, М.С. Бондаренко**

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ

НОВІТНІ СВЕРДЛОВИННІ ГЕОТЕХНОЛОГІЇ ОСВОЄННЯ КОРИСНИХ КОПАЛИН



Описані теоретичні та експериментальні дослідження деформування геофізичних середовищ з урахуванням нерівноважності, структурованості та попередньо напруженого стану. Розроблені та впроваджені нові технології, обладнання та методики по визначенню пористості, характеру насичення, коефіцієнта газонафтонасичення колекторів нафти і газу, підвищенню дебіту свердловин з видобутку нафти та природної води.

Ключові слова: геотехнологія, геофізичні пристрої, експеримент, каротаж, колектори, корисні копалини, методика, свердловина.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У практиці гірничої справи застосовуються різні методи видобування корисних копалин, серед яких *відкритий видобуток, шахтний видобуток, свердловинні способи*. Сьогодні гірнича промисловість вимушена експлуатувати родовища, що залягають на значній глибині та у складних гірничо-геологічних умовах. За таких умов особливого значення набувають геотехнологічні методи безшахтного видобутку корисних копалин, що в ряді випадків виявляються єдиною можливими способами проведення гірничих робіт [1–4].

Свердловинна геотехнологія використовується не тільки при традиційному видобутку рідких і газоподібних копалин, але також і при підземній виплавці сірки, газифікації вугілля та інших горючих корисних копалин, перегонці бітумінозних сланців, видобутку руд твердих корисних копалин, вилужуванні розчинних солей, видобутку термальних вод Землі, природної води і т.п.

Як правило, всі системи безшахтного видобування корисних копалин характеризуються певною загальністю технологічної схеми процесу. При використанні свердловинних методів продуктивну зону розбурюють серією свердловин, призначених безпосередньо для видобування корисного компонента (нафти, газу, підземних вод), або для нагнітання робочого флюїду та його подальшого видобутку в збагаченому стані (закачування води в зону термічного котла; ін'єктування теплоносіїв при підземній виплавці сірки або видобутку в'язких нафт; нагнітання кислотних розчинів при вилужуванні руд).

Ефективна робота таких систем можлива лише при достатньо високій проникності гірських порід, охоплених технологією робіт, а також при забезпеченні стійкого гідродинамічного зв'язку оточуючого породного масиву із технологічною свердловиною.

В дослідженнях по інноваційному науково-технічному проекту «Новітні геотехнології видобутку корисних копалин» (2010 р.) основна увага приділялась свердловинним методам видобутку нафти та газу – корисним копалинам,

що мають важливе значення для паливно-енергетичного комплексу України. В проекті передбачалося вивчення таких питань:

- ✦ аналіз сучасного стану розробок по добуванню корисних копалин геотехнологічним способом та результатів його впровадження при видобутку мінеральних ресурсів (нафти, природного газу, природної води);
- ✦ теоретичні дослідження по деформуванню геологічних середовищ з урахуванням їх нерівноважності, структурованості та попередньо напруженого стану;
- ✦ розвиток теорії розповсюдження хвильових збурень у флюїдонасиченому геологічному середовищі;
- ✦ аналіз сейсмічних даних, отриманих в польових експериментах, та зіставлення експериментальних результатів з даними комп'ютерного моделювання;
- ✦ розробка нової методики дорозвідки та уточнення геологічної будови родовищ;
- ✦ розробка інтерпретаційно-методичної основи нової технології визначення пористості, характеру насичення і літологічних властивостей порід-колекторів;
- ✦ свердловинні дослідження нафтогазових колекторів на основі комплексу радіоактивного і акустичного каротажів та аналіз результатів інтерпретації у співставленні з іншими методами геофізичних досліджень;
- ✦ розробка нової технології підвищення дебіту нафтогазових свердловин;
- ✦ створення торпед нового покоління для підвищення дебіту свердловин з фільтром по видобуванню нафти та природної води.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОНАННЯ ПРОЕКТУ

1. Встановлені переваги та недоліки різних методів впливу на продуктивну зону породного масиву (перфорація та торпедування свердловин, гідророзрив пластів, імпульсія, ударно-акустична та хвильова дія, комплексні технології). Проаналізовані технічні можливості пристроїв та обладнання для реалізації свердловинних геотехнологій (акумулятори та гідро-

генератори тиску, апаратура акустичної дії та обладнання для реалізації ударно-хвильової дії, секційні торпеди та труборізи посиленої дії, геофізичні прилади радіоактивного каротажу). Наведені дані впровадження свердловинних геотехнологій для підвищення нафтогазовіддачі продуктивних пластів та співставлення досягнутих результатів різними методами.

2. Отримані визначальні рівняння багатокомпонентних геофізичних середовищ із урахуванням структурної релаксації. Такі рівняння можуть бути використані для опису динаміки багатокомпонентних релаксуючих геофізичних середовищ як в одношвидкісному наближенні, так і для опису динаміки однокомпонентного релаксуючого середовища. Разом з додатковими умовами сумісного деформування компонент це дало можливість побудувати модель релаксуючого багатокомпонентного середовища, придатну для опису широкого класу нелінійних процесів деформування релаксуючих багатокомпонентних геофізичних середовищ.

3. На основі комп'ютерного моделювання вибухів сферичних зарядів в попередньо напруженому гірському масиві отримані залежності зони мікро- та макроруйнувань від глибини розташування зарядів. Встановлено, що зі збільшенням глибини розміри зони мікро- і макроруйнувань зменшуються. У випадку використання дилатансійної моделі обидві зони перевищують відповідні зони без урахування дилатансії.

4. Досліджені спектральні характеристики в процесі обробки в'язко-пружних систем імпульсним навантаженням, а також вплив частоти навантаження на зміну коефіцієнта в'язкості в'язкопружної системи. Встановлено, що при збільшенні кругової частоти гармонічної дії на систему в'язкість рідини суттєво зменшується. Це може бути використано у технологічних методах інтенсифікації видобутку корисних копалин (в'язких і сильнов'язких нафт і т. п.) [5].

5. Встановлені границі застосування методу тривимірного моделювання сейсмічних хвиль, застосування якого допомагає виявити і лока-

лізувати ділянки середовища, які не вкладаються в рамки такої моделі і вимагають дорозвідки. Розроблена методика та програмне забезпечення обробки матеріалів польового експерименту, проведено аналіз сейсмічних даних хвильового поля, що виникає від збудника, розташованого на великій глибині. Зіставлення теоретичних та експериментальних даних дає підстави стверджувати, що при малопотужних вибухах у свердловинах на денній поверхні принципово можна зареєструвати пружні коливання, які несуть інформацію про будову геологічних шарів у свердловині. Це було використано для розробки нової методики дорозвідки та уточнення геологічної будови родовищ.

6. Показана висока ефективність спільного застосування нових приладів радіоактивного каротажу (РК), розроблених в ІГФ НАН України, разом з сучасною апаратурою акустичного каротажу (АК) виробництва Київського заводу «Геофізприлад». Розроблені способи використання нової апаратури радіоактивного і акустичного каротажу дають можливість значно підвищити інформативність, достовірність і точність визначення параметрів нафтогазових колекторів.

Підтверджена можливість практичної реалізації таких розроблених і запатентованих способів:

- ✦ способи отримання та використання модифікованих кадмієвої різниці та кадмієвого відношення;
- ✦ мультиплікативні способи визначення пористості глинистих гірських порід в обсаджених і необсаджених свердловинах за допомогою комплексів нейтронного + гамма-каротажу (НК + ГК) та акустичного + гамма-каротажу (АК + ГК). Способи дозволяють визначати пористість глинистих порід виключно геофізичними методами (без використання кернових даних), що підвищує оперативність та знижує вартість робіт [6];
- ✦ група способів виділення газонасичених пластів за допомогою комплексу НК + ГК + АК. При цьому важливим елементом практич-

ної реалізації запропонованих способів є використання нових приладів НК і АК з покращеними геофізичними характеристиками. Способи показали свою ефективність як в необсаджених, так і в обсаджених свердловинах (в т.ч. в свердловинах старого фонду), а також в розрізах, де присутні так звані *низькоомні колектори*;

- ✦ способи визначення розширеної сукупності петрофізичних параметрів колекторів на основі комплексу нейтронного, гамма- і гамма-гамма-каротажу (НК + ГК + ГГК) [7].

7. Переваги нової технології, яку можна позначити формулою (НК + ГК) + (АК + ГК), полягають ось у чому:

- ✦ методи НК і АК мають різну фізичну основу і їх спільне застосування дає синергетичний ефект при визначенні особливостей літології, порового простору, характеру насичення, коефіцієнта нафтогазонасиченості та інших параметрів колекторів;
- ✦ технологія працює як в необсаджених, так і в обсаджених (в т.ч. двічі) стальними колонами свердловинах;
- ✦ технологія дає позитивні результати для необсаджених свердловин у випадках, коли електричний каротаж малоінформативний (напр., для карбонатних і так званих низькоомних колекторів);
- ✦ у випадку, коли дослідження в необсадженої свердловині з якоїсь причини не були проведені чи виявились неякісними або неефективними, нова технологія дозволяє отримати кількісну оцінку необхідних параметрів колекторів через обсадку.

8. На матеріалах свердловинних досліджень показана висока ефективність використання нових приладів багатозондового узгодженого нейтронного каротажу (БУНК) в комплексі з ГК та АК та їх інтерпретаційно-методичного забезпечення при оцінці літології, виділенні колекторів, визначенні пористості, розділенні газо- і водоносних пластів, виявленні обводнених пластів, встановленні положення флюїдо-контактів та ін.

Визначення за допомогою нових приладів типу БУНК «нейтронної» пористості за НК і загальної пористості за РК (НК + ГК) дає можливість провести сумісний аналіз з даними по «акустичній» пористості за АК та відкритій пористості за АК* (з урахуванням глинистості за ПС або за ГК). Це дозволяє підвищити інформативність і достовірність результатів каротажу при оцінці фільтраційно-ємнісних властивостей гірських порід в досліджуваному розрізі.

З метою оцінки газонасиченості пластів застосовано низку нових підходів, які базуються на комплексах НК + АК, РК + АК*, НК + ГК. Порівняння з даними електричного каротажу (ЕК) підтвердило високу ефективність розроблених способів. Використання комплексу РК + АК дає можливість визначати характер насичення колекторів у випадках, коли ЕК недостатньо інформативний.

Виконана оцінка характеру насичення пластів, які за даними ЕК є невизначеними або сумнівними. Звернено увагу на ряд пластів, які за даними комплексу РК + АК є газонасиченими (хоча за даними стандартного комплексу ЕК ці пласти не попадають до категорії перспективних). Розглянуті приклади комплексного використання радіоактивного і акустичного каротажу для дослідження нафтогазових колекторів показують, що розроблена технологія є досить ефективною.

Розробка основних принципів нової технології дослідження колекторів є результатом співробітництва Інституту геофізики НАН України, заводу «Геофізприлад», ЗАТ «Укрпромгеофізика» та ТОВ «Укрспецгеологія». Саме завдяки об'єднанню зусиль організацій різного профілю вдалося отримати реальні результати. Технологія вимагає розширення в напрямку адаптації до різноманітних геолого-технічних умов та подальшої розробки і вдосконалення відповідного інтерпретаційно-методичного забезпечення.

Існує необхідність продовження аналогічних робіт з свердловинами різних діаметрів та обсадок в різноманітних, в т.ч. складних, гео-

логічних умовах з метою набору статистики та удосконалення розвинутих підходів і уточнення критеріїв їх використання. Для підвищення інформативності і отримання кількісних результатів особливо важливими є дослідження розрізів без зони проникнення фільтрату промивальної рідини (проведення РК новими приладами через бурові труби в процесі буріння; використання промивальних рідин на емульсійній основі; проведення каротажу в обсаджених свердловинах з розформованою зоною проникнення фільтрату).

9. На основі газової детонації розроблені конструкції пристроїв для торпедування водозабірних свердловин. Торпеди виконані з металу, створено стенд для заповнення торпед газами пропан та кисень, відпрацьована методика підготовки торпед до вибуху суміші газів. Налаштовані дві конструкції торпед: на 4 та 8 вікон з діафрагмами, в яких вікна розташовані під кутом 90° на однаковій відстані одне від одного на поверхні сталюого циліндра.

Досліди показали, що детонацію суміші газів стабільно ініціює вибух дротинки під дією електричного струму з напругою не менш ніж $U = 2,7$ кВ.

В розглянутих діапазонах тисків пропану та кисню характерною ознакою торпед з газовою детонацією є створення потужного регульованого імпульсу тиску ~ 1 ms, $60 \div 250$ атм та сильного розрідження за фронтом ударної хвилі, характер якого залежить від геометричних розмірів торпеди та складу суміші. Величина амплітуди імпульсу тиску регулюється шляхом зміни тиску пропану та кисню в суміші газів у торпеді. Сильне розрідження спостерігається напроти вікон. Під кутами 90° та 180° до вікон розрідження не реєстрували. Торпеда з ГД створює імпульси тиску у воді в $10 \div 40$ раз довші, ніж торпеда з ЕГД. Малі статичні тиски газової суміші в торпеді з ГД приблизно у 100 разів менші, ніж у торпеді з клапанами і призводять до менших гідропотоків.

Створено два стенди для дослідження дії торпед з газовою детонацією на навколишнє

середовище (для суцільної та перфорованих труб-фільтрів). Досліджено дві конструкції фільтрів: перфорована труба з сіткою і прошарком дроту та перфорована труба з прошарками дроту. Фільтри обмазувались бетоном, який служив моделлю кольматанту.

Експериментально визначені амплітуди імпульсів тиску $P_{\text{гран.}}$, для яких є характерним початок пластичної деформації фільтрів. Для $P < P_{\text{гран.}}$ досліджена руйнівна дія на кольматант імпульсів тиску від торпеди з газовою детонацією. Встановлено, що кольматант під дією ударного навантаження повністю руйнується, поверхня фільтра стає вільною від забруднень.

Підготовлене технологічне обладнання для обробки водозабірних свердловин випробуване на діючих промислових свердловинах.

10. Розроблена нова технологія підвищення дебіту свердловин нафтових родовищ, які знаходяться на пізній стадії експлуатації [8]. Це дуже важливо для підвищення коефіцієнта освоєння українських нафтових родовищ, які в більшості своїй перебувають на завершальній стадії вилучення вуглеводнів із надр.

В період виконання робіт по Проекту було отримано патенти на винаходи «Спосіб визначення загальної пористості глинистих гірських порід» [9] та «Прилад радіоактивного каротажу для дослідження колекторів нафти і газу» [10].

ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБІТ ПО ПРОЕКТУ

1. Нові прилади радіоактивного каротажу типу СНК і БУНК для визначення пористості і характеру насичення колекторів пройшли апробацію у виробничих умовах і широко використовуються при дослідженні нафтогазових свердловин Шебелинською польовою геофізичною партією (ЗАТ «Укрпромгеофізика») та ТОВ «Укрспецгеологія».

2. Розроблені та передані замовнику «Методичні рекомендації з обробки та інтерпретації даних багатозондового узгодженого нейтронного каротажу нафтогазових свердловин в комплексі з гамма- і акустичним каротажем». Роз-

роблені підходи вимагають підвищення точності визначення параметрів колекторів за РК і АК. Тому застосування нових приладів з покращеними геофізичними характеристиками і розширеним набором інтерпретаційних параметрів (типу СНК, БУНК, АМАК) є необхідною умовою підвищення ефективності виділення продуктивних колекторів, визначення їх пористості і (за певних умов) кількісної оцінки підрахункових параметрів запасів вуглеводнів.

Нова технологія конкурентноздатна: при підвищених методичних можливостях і покращених геофізичних параметрах нова українська апаратура та її інтерпретаційно-методичне забезпечення на внутрішньому ринку на порядок дешевша порівняно з зарубіжними аналогами. Українські розробники володіють необхідними *know-how* для виробництва нової апаратури та створення її інтерпретаційно-методичного забезпечення. Потрібні підтримка та відповідне (відносно невелике) фінансування для того, щоб зайняти свою нішу на ринку геофізичної продукції.

3. Технологія регенерації фільтрів водозабірних свердловин з використанням газових торпед пройшла успішні випробування на свердловинах Обухівського та Фастівського водопровідно-каналізаційних підприємств і рекомендована для обробки водозабірних свердловин з метою підвищення їх дебіту.

4. В процесі роботи над проектом проведено аналіз даних свердловин ГПУ «Полтавагазвидобування», «Харківгазвидобування», «Шебелинкагазвидобування» з метою оцінки можливостей підвищення їх дебіту при застосуванні імпульсних методів.

5. Технологія підвищення дебіту видобувних свердловин за рахунок енергії вибуху торпед секційних ТС-45 шляхом розущільнення породи-колектора у привибійній зоні продуктивного пласта випробувана на газовій свердловині № 26 Розумівського родовища (ГПУ «Полтавагазвидобування»). В результаті дебіт свердловини № 26 Розумівського родовища підвищився від 1,5 до 2,0 тис. м³/добу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чекунов А.В., Вовк А.А., Михалюк А.В. Физико-технические проблемы использования энергии взрыва при совершенствовании скважинных геотехнологических систем извлечения полезных ископаемых // Взрывные работы в грунтах и горных породах. — Киев: Наук. думка, 1984. — С. 3—26.
2. Аренис В.Ж. Скважинная добыча полезных ископаемых (геотехнология). — М.: Недра, 1986. — 240 с.
3. Егоров П.В., Шевелев Ю.А., Ваганов М.С., Зайнуллин Р.Р. Геотехнологические способы разработки полезных ископаемых. — Кемерово: КузГТУ, 2004. — 135 с.
4. Пучков Л.А., Шаровар И.И., Виткалов В.Г. Геотехнологические способы разработки пластовых месторождений. — М.: Горная книга, 2006. — 318 с.
5. Нагорный В.П., Денисюк И.И. Спектры и их приложения к задачам взрывного дела. — К.: Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, 2010. — 184 с.
6. Бондаренко М.С., Кармазенко В.В., Кашуба Г.О., Кулик В.В. Определение пористости глинистых пород в обсаженных нефтегазовых скважинах с помощью радиоактивного и акустического каротажа // Геофиз. журн. — 2010. — Т. 32, № 2. — С. 110—120.
7. Звольский С.Т., Кетов А.Ю., Кулик В.В. и др. Скважинные ядерно-геофизические исследования приповерхностных горных пород. 1 // Геофиз. журн. — 2010. — Т. 32, № 6. — С. 215—230.
8. Нагорный В.П., Денисюк И.И., Лихван В.М., Рудюк Я.О. Дослідження амплітудно-частотного спектру хвиль тиску, що випромінюються газовим пухирем // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Материалы XX Международ. науч. школы им. акад. Христиановича. — Симферополь: Таврический нац. ун-т им. В.И. Вернадского. — 2010. — С. 244—247.
9. Патент України на винахід № 90301, МПК G01V 5/00. Спосіб визначення загальної пористості глинистих гірських порід в обсаджених і необсаджених свердловинах / Кулик В.В., Бондаренко М.С. Заявник і патентовласник: Інститут геофізики НАН України. Опубл. 26.04.2010. Бюл. № 8.
10. Патент України на винахід № 92545, МПК G01V 5/00. Прилад радіоактивного каротажа для дослідження колекторів нафти і газу в обсаджених і необсаджених свердловинах / Кармазенко В.В., Кулик В.В., Бондаренко М.С., Маслюк О.С. Заявник і патентовласник: Інститут геофізики НАН України. Опубл. 10.11.2010. Бюл. № 21.

*В.П. Нагорний, В.В. Кулик,
С.Т. Звольський, І.І. Денисюк, М.С. Бондаренко*

НОВЕЙШИЕ СКВАЖИННЫЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ
ОСВОЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Описаны теоретические и экспериментальные исследования деформирования геофизических сред с учетом неравновесности, структурированности и предварительно напряженного состояния. Разработаны и внедрены новые технологии, оборудование и методики по определению пористости, характера насыщения, коэффициента газонефтенасыщенности коллекторов нефти и газа, повышению дебита скважин для добычи нефти и природной воды.

Ключевые слова: геотехнология, геофизические устройства, эксперимент, каротаж, коллекторы, полезные ископаемые, методика, скважина.

*V.P. Nagorny, V.V. Kulyk,
S.T. Zwolskyi, I.I. Denysiuk, M.S. Bondarenko*

NOVEL BOREHOLES GEOTECHNOLOGIES
OF MINERAL RESOURCES DEVELOPMENT

Theoretical and experimental investigations of geophysical media deformation taking into consideration nonequilibrium, structuring and pre-stressed state are described. New technologies, equipment and techniques to determine porosity, saturation nature and coefficient of hydrocarbon saturation of oil and gas reservoirs; to increase production rate for oil and natural water boreholes are developed and introduced.

Key words: geotechnology, geophysical equipment, experiment, logging, reservoirs, mineral resources, methods, borehole.

Надійшла до редакції 01.03.11