

ГЕОФІЗИЧНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТИПУ ФЛЮЇДОНАСИЧЕННЯ ПОРІД ДЛЯ ОЦІНКИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТІВ

О. Гнатюк, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0003-2218-0295

В. Косарчин, к. ф.-м. н.

ORCID ID: 0000-0003-3438-9707

Львівський національний аграрний університет

Л. Скакальська, к. ф.-м. н.

ORCID ID: 0000-0002-0383-7290

Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Суботіна НАН України

<https://doi.org/10.31734/architecture2021.22.044>

Гнатюк О., Косарчин В., Скакальська Л. Геофізичні методи прогнозування типу флюїдонасичення порід для оцінки фізико-механічних властивостей ґрунтів

Використання геофізичних методів для розв'язання інженерно-геологічних задач дає змогу отримати значну економію часу та коштів за доволі високої точності результатів. Найбільш широко використовуються методи електророзвідки, сейсморозвідки, радіоактивний каротаж. За допомогою цих методів визначають параметри міцності, пористості, тріщинуватості, водонасиченості та інших фізико-механічних характеристик гірських порід. Теоретичні та експериментальні дослідження дають змогу встановлювати зв'язок між цими параметрами і фізичними властивостями порід, визначеними під час геофізичних досліджень.

Теоретико-емпірична методика прогнозування пружних характеристик гірських порід у розрізах свердловин реалізується як система теоретичних та емпіричних співвідношень та побудований функціонал. У методиці використано дані акустичного каротажу (АК) та кернових досліджень. Виведено теоретичні залежності між пружними параметрами гірських порід з урахуванням впливу тиску (глибини), пористості, нелінійної пружності та структурно-дисперсійними особливостями гірських порід (шаруватість, мікропористість). Побудовано емпіричні залежності між фізичними та колекторськими властивостями гірських порід із застосуванням параметричної бази даних гірських порід окремих територій та геологічних структур. Тип заповнювача пор породи прогнозується порівнянням результатів обчислення швидкостей відповідно до теоретичних та емпіричних залежностей та фактичних даних АК, за густиною заповнювача або стисливістю породи у кожному досліджуваному прошарку. Для випадків відсутності даних АК розроблено варіанти методики прогнозування з використанням даних гамма-каротажу, електричного каротажу або офсетних даних. Адекватний набір програмних засобів розроблено в середовищах *Fortran*, *C#* та *Excel*.

Ключові слова: інженерні вишукування, геофізичні методи досліджень, методика прогнозування, емпіричні співвідношення, акустичний каротаж, кернові дослідження, пористість, стисливість.

Hnatiuk O., Kosarchyn V., Skakalska L. Geophysical methods for prediction of the type of fluid saturation of rocks to assess the soil physical and mechanical properties of soils

The use of geophysical methods in solving engineering and geological problems makes it possible to save of time and money with a fairly high accuracy of results. The most widely used methods are electrical exploration, seismic exploration, radioactive logging. Using these methods the parameters of strength, porosity, fracture, water saturation and other physical and mechanical characteristics of rocks are determined. Theoretical and experimental studies make it possible to establish a relationship between these parameters and the physical properties of rocks determined during geophysical surveys.

The theoretical-empirical methodology of prediction of the elastic characteristics of rocks in cuts of wells is realized as a system of theoretical and empirical relations and the resulting functional. It is based on acoustic logging (AL) and the core research (CR) data. The theoretical relations between the elastic parameters of rocks taking into account the influence of pressure (depth), porosity, nonlinear elasticity according to the structural and dispersive features of rocks (stratification, microporosity) are derived. The empiric dependences between physical and collector properties of rocks with the use of parametric database for rock-collectors of particular territories and geological structures are built. The type of rock pores filler is predicted by a comparison of the results of velocities calculations according to the theoretical and empirical dependences and the factual data of AL, by filler density or compressibility of rock. For the cases of the acoustic logging data absence, the variants of the prediction methodology by using the data of gamma-logging, electric logging, and offset logging are developed. The adequate set of software tools is developed in the Fortran, C# and Excel environments.

Key words: engineering researches, geophysical research methods, prediction methodology, empirical relationships, acoustic logging, core research, porosity, compressibility.

Постановка проблеми. Використання геофізичних методів під час розв'язання інженерно-геологічних задач дає змогу отримати значну економію часу та коштів за доволі високої точності результатів [2]. Але вони мають обмежені галузі застосування, тому використовуються лише деякі з них і в комплексі з іншими методами досліджень – бурінням опорних свердловин, визначенням характеристик ґрунтів лабораторними методами тощо.

Під час інженерно-геологічних вишукувань визначають параметри міцності, пористості, тріщинуватості, водонасиченості та інших фізико-механічних характеристик гірських порід.

Актуальність точності оцінок властивостей масивів ґрунтів перед проведенням будівельних робіт зрозуміла, адже зростає потреба в доброякісних, комфортних і безпечних будівлях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з додатком К ДБН А 2.1-1-2014 «Інженерні вишукування для будівництва» для встановлення інженерно-геологічних нашарувань ґрунтів основи фундаментів ділянки будівництва, місць розташування і форми локальних неоднорідностей, вивчення геологічних процесів, гідрогеологічних характеристик підземних вод, складу, стану і властивостей ґрунтів використовують методи електро- та сейсморозвідки, різні види каротажу, гравірозвідку, магніторозвідку, термометрію, резистивіметрію, лабораторні виміри швидкостей пружних хвиль, реєстрацію блукаючих струмів тощо [1].

Починаючи з інтерпретації на якісному рівні, технології обробки даних ГДС стають все складнішими, кількісними, комп'ютеризованими, з використанням багатомірних кореляційних залежностей і багатопараметричних петрофізичних зв'язків, із залученням усе складніших фізико-математичних моделей гірських порід [3–7].

Постановка завдання. Завданням досліджень є вдосконалення методики для розрахунків комплексу пружних параметрів і прогнозування наявності та типу флюїдонасичення у породах різних типів і генезису.

Виклад основного матеріалу. На наш погляд, простим і дешевим засобом для розрахунку фізико-механічних параметрів гірських порід є розроблена нами теоретико-емпірична методика прогнозування пружних властивостей та типу заповнювача пор [4–6], яка дає змогу з високою довірчою ймовірністю визначати ряд пружних

характеристик порід, таких як стисливість, модуль зсуву, густина, діючі тиски, пористість, тип заповнювача пор у кожному прошарку, заданому вхідними даними акустичного (АК) чи іншого (електричного, гамма-, сейсмічного) проведеного каротажу в розрізі свердловини. Точність прогнозу коефіцієнта пористості сягає 94 %, відхилення величин, розрахованих засобами методики швидкостей, від заданих вимірюваннями за АК – 4,73 %, тип заповнювача пор у кожному прошарку порід у розрізах тестованих свердловин збігся [3].

Для уточненого розрізнення типу рідини – заповнювача пор (нафти і води) у розрізах свердловин додатково до розрізнення за швидкостями пружних хвиль розроблено і зреалізовано методики такого розрізнення за стисливістю та за густиною заповнювача пор, що забезпечують розрізнення як для високопористих ($\varphi \geq 10\text{--}12\%$), так і для щільних ($\varphi = 6\text{--}10\%$) і нетрадиційних мало-пористих ($\varphi = 5\text{--}6\%$) порід-колекторів. Обчисленням загальної пористості водонасичених прошарків на інтервалі розрізу свердловини отримуємо вологовмісність ґрунтів на досліджуваному інтервалі глибин.

Розроблений спосіб визначення типу породи за розрахованою засобами методики стисливістю твердої фази породи і спосіб оцінювання (детально по прошарках) тріщинуватості та проникності порід розрізу [3] дають змогу дійти необхідних у будівельних розрахунках висновків.

Обґрунтованість і достовірність такої математичної розробки забезпечені використанням адекватних реальним об'єктам фізико-математичної моделі гірських порід і моделі розрізу свердловини; використанням апробованих методів математичного моделювання (метод найменших квадратів, статистичними дослідженнями кореляційних побудов та ін.), чіткими математичними викладками; ітераційним наближенням значень фізичних і швидкісних характеристик порід, розрахованих за встановленими теоретичними та емпіричними залежностями, до даних каротажних і кернових досліджень; коректною математичною обробкою результатів геофізичних досліджень свердловин. Усе це забезпечує узгодженість результатів прогнозування типу флюїдонасичення порід розрізів свердловин та розрахунків пружних параметрів і відповідних петрофізичних характеристик із даними випробувань цих свердловин та з даними досліджень інших авторів (В. Баюк, В. Добринін, І. Безродна та ін.).

Комп'ютерна реалізація методики. Для реалізації прогнозовної методики побудовано відповідні загальні алгоритми розрахунків та алгоритми

роботи окремих програмних модулів і розроблено відповідне програмне забезпечення у середовищах *Fortran*, *C#* і *Excel* [7].

Комп'ютерна алгоритмічно-програмна реалізація методики передбачає, серед іншого, циклічні ітераційні процедури розрахунків з автоматичним та інтерактивним (за участю інтерпретатора) підбором оптимальних наборів петрофізичних параметрів порід з багатомірного простору реальних характеристик цих порід за критеріями максимальної збіжності (мінімальних відхилень) між розрахованими швидкостями пружних хвиль та даними АК чи інших каротажів.

Програмне забезпечення для реалізації прогнозної методики (обчислення сукупності петрофізичних та колекторських параметрів порід і прогнозу типу флюїду – заповнювача пор по розрізу свердловини) розроблено в середовищах *Fortran* (програма «Прогноз-НГК-Ф») та *C#* («Прогноз-НГК-С»). Побудову базових і уточнених емпіричних співвідношень, визначення стандартних відхилень їхніх коефіцієнтів (для подальших оцінок надійності прогнозу типу флюїду), обчислення параметрів твердої фази порід, формування порівняльних та узагальнених таблиць результатів, побудову графіків змін різних петрофізичних та колекторських параметрів порід по розрізу свердловини, петрофізичний аналіз цих параметрів, дослідження мультиплікативної складової залежності стисливості (швидкостей) від пористості і тиску для різних порід виконано в середовищі *Excel*.

Висновки. Методика може застосовуватись для розрахунків комплексу пружних параметрів і прогнозування наявності та типу флюїдонасичення у породах різних типів і генезису, що підтверджують результати її апробації (з використанням розробленого програмного забезпечення)

для обробки даних щодо сланцевих, вапнякових і пісковикових порід.

Результати досліджень можуть бути також корисними для підвищення ефективності оцінок будівельних характеристик порід, у гідрогеологічних та гідрогеоелекологічних дослідженнях, для уточнення гідрогеологічного режиму горизонтів, зокрема для оцінок можливих геоелекологічних ризиків під час таких робіт.

Бібліографічний список

1. ДБН А.2.1-1-2014. Інженерні вишукування для будівництва. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 126 с. [Чинний від 01.08.2014].
2. Зоценко М. Л., Коваленко В. І., Хілобок В. Г., Яковлев А. В. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти: підручник. Київ: Вища шк., 2004. 562 с.
3. Скакальська Л. В. Прогнозування пружних характеристик та нафтогазоводонасиченості порід в розрізах свердловин за даними акустичного каротажу і кернових досліджень: автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. Київ: ІГФ НАН України, 2021. 21 с.
4. Скакальська Л. В. Прогнозування фізичних та колекторських властивостей порід-колекторів у геологічних структурах із нетрадиційним газом. *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка. Геологія*. 2014. № 1 (64). С. 35–40.
5. Скакальська Л. В., Назаревич А. В. Прогнозування нафтогазоводонасиченості порід різної літології та геодинамічного генезису у розрізах свердловин. *Геодинаміка*. 2015. № 1 (18). С. 102–119.
6. Скакальська Л. В., Назаревич А. В., Косарчин В. І. Теоретико-емпірична методика прогнозування вуглеводнів у розрізах свердловин з базовим параметром – стисливістю. *Мінеральні ресурси України*. 2018. № 4. С. 18–25.
7. Скакальська Л. В., Назаревич А. В., Струк Є. С. Алгоритми та програми обробки каротажних даних у прогнозуванні нафтогазоносності порід розрізів свердловин. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. 2017. № 864. С. 210–221.

Стаття надійшла 30.06.2021