

# ГЕОЛОГІЧНІ НАУКИ

УДК 553.981/982

## ОЦІНКА ТЕКТОНІЧНОЇ ТРІЩИНУВАТОСТІ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Артим І.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Показано, що одним з перспективних методів оцінки тріщинуватості порід-колекторів є аналіз їх напружено-деформованого стану шляхом математичного моделювання геодинамічних процесів у піщано-алевритовій флішовій товщі. Розроблено за допомогою методу скінченних елементів параметричну 2D модель для досліджень тектонічної тріщинуватості піщано-алевритової товщі, обумовленої геодинамічними процесами. Параметрами моделі є товщина прошарку, довжина активної ділянки, висота підйому ділянки, основні фізико-механічні характеристики матеріалу, а також граничні умови. Досліджено вплив даних параметрів на напружено-деформований стан шару пісковика з точки зору можливості появи зон високої тріщинуватості та оцінки їх місцезнаходження. Результати даних досліджень дадуть змогу якісніше прогнозувати високопроникні зони формування вторинних колекторів, що дозволить допошукувати скучення нафти і газу в Західноукраїнському нафтогазоносному регіоні.

**Ключові слова:** пісковик, колектор, тріщинуватість, геодинамічні процеси, параметрична 2D модель, метод скінченних елементів.

**Постановка проблеми.** Загальновідомим є факт, що на малих і середніх глибинах (стадії початкового катагенезу) колекторські властивості осадових порід, в основному, контролюються літолого-фаціальними умовами седиментогенезу.

Для вищевказаних глибин, при дефіциті склепінних пасток, існує суттєвий резерв, а саме пастки літологічного, стратиграфічного та комбінованого типів, прогноз і цілеспрямовано дослідження яких практично не здійснюється.

Перспективи нафтогазоносності на сучасному етапі не можуть оцінюватись без дослідження вторинних перетворень осадових порід та особливостей зміни їх колекторських властивостей.

На даному етапі надзвичайно актуальним і важливим є детальне дослідження закономірностей геодинаміки процесів, які призводять до формування зон розущільнення, що дасть змогу здійснювати більш точно їх прогноз на локальних об'єктах і суттєво підвищити ефективність ведення пошукових робіт на великих глибинах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При формуванні порід-колекторів у розрізі осадової товщі важливу роль відіграють геодинамічні процеси, тобто об'єднані в часі та просторі процеси, які впливають не тільки на деформацію гірських порід та створення структурних форм-пасток, але й на їх колекторські властивості [1].

Детальним літологічним вивченням порід-колекторів Карпатської нафтогазоносної провінції встановлена низка особливостей вторинних (епігенетичних) змін порід як регіонального, так і локального характеру [2]. Особливо це наглядно проявляється при дослідженні пісковиків та алевролітів, які є основними потенційними колекторами вуглеводнів. В регіональному плані внаслідок епігенетичних структурних змін гранулярна пористість уламкових порід в стадію пізнього катагенезу знижується до 5-8%, тобто ці породи вже не є промисловими колекторами.

В той же час, на фоні прогресивних процесів втрати первинної ємності на багатьох локальних об'єктах в осадових породах встановлено вторинну пористість, кавернозність мікро- та макротріщинуватість, стилілітизацію і т. і. Все це чітко зафіксовано при детальному стадіальному аналізі зразків кернів та шліфів. Всі ці процеси сподінені в часі і просторі з парагенетичною асоціацією мінеральних новоутворень: карбонати, сульфати, сульфіди, силікати, тверді вуглецеві утворення, вуглеводні. Важливо підкреслити – ці утворення аутигенні, пов'язані з процесами вторгнення глибинних флюїдів в осадову товщу по диз'юнктивних порушеннях, зонах дрібнення, стінках соляних штоків [3].

За рахунок процесів розущільнення колекторські властивості осадових порід в стадію пізнього катагенезу різко покращуються, пористість може досягати 20-30%, тобто в порівнянні з залишковою гранулярною (критичною) пористістю, пористість зростає в 4-6 і більше разів, проникність (особливо з врахуванням тріщинної) зростає в сотні і тисячі разів.

Слід відмітити, що в ряду стадійних процесів формування ефективного вторинного колектора, який і являється ємністю для вуглеводнів на великих глибинах, є найбільш молодий процес [4].

Таким чином, вищенаведене свідчить про те, що на великих глибинах основний резерв для відкриття нових покладів на відкритих вже родовищах і нових родовищах на перспективних об'єктах слід пов'язувати саме з вторинними колекторами глибинного походження [5].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Результати досліджень вказують на те, що відкриті тріщини найчастіше зустрічаються у піщано-алевритовій флішовій товщі. Ймовірно, саме прошарки пісковиків та алевролітів є тим каркасом, який бере на себе основні геодинамічні навантаження при тектонічних рухах, що в кінцевому результаті зумовлює

утворення тріщин. Наявність відкритих та частково відкритих тріщин з присутністю різнотипових вуглеводневих речовин фіксувалась у шліфах багатьох свердловин [4].

Через невизначеність типу колектора, особливостей його порового простору та геологічної будови ділянок чи покладу в цілому унеможливується кількісне моделювання будови і режиму роботи нафтогазових родовищ з метою прогнозування продуктивності свердловин. Ключовим моментом для цього є визначення розподілу проникності, що й визначає неоднорідність резервуару. Традиційні геологічні моделі, які зводяться до побудови комплексу карт пористості, піскуватості і т. п. не допомагають у вирішенні питання точного і детального вивчення резервуару у випадках складної будови або високого ступеня роздробленості родовища [6].

На нашу думку, одним з перспективних методів оцінки тріщинуватості порід-колекторів є аналіз їх напружено-деформованого стану шляхом математичного моделювання геодинамічних процесів у піщано-алевритовій флішовій товщі.

**Мета статті** – розроблення моделі, в якій буде досліджено тектонічну тріщинуватість піщано-алевритової товщі, обумовлену геодинамічними процесами.

**Виклад основного матеріалу.** В основі моделі лежить твердження про те, що головним чинником утворення тектонічної тріщинуватості порід є їх напружено-деформований стан (НДС) у період активних геодинамічних процесів. Інтенсивність утворення тріщин залежить від рівня внутрішніх напружень, спричинених деформаційними процесами в окремих прошарках піщано-алевритової товщі. Таким чином можна вважати, що висока тріщинуватість буде в місцях перевищення внутрішніми напруженнями границі міцності породи.

Також дуже важливим для розроблення моделі є урахування реологічних властивостей гірських порід. Утворення складок відбувалося протягом дуже великих проміжків часу. За таких умов аргіліти та алевrolіти, особливо з домішками глини, практично втрачають пружні властивості і поведуть себе як рідини. Це означає, що навіть інтенсивна деформація прошарків аргілітів та алевrolітів не призводить до підвищення їх внутрішніх напружень. Таким чином, утворення зон високої тріщинуватості у піщано-алевритовій товщі в першу чергу залежить від НДС прошарків пісковиків.

Тому вирішено дослідити вплив активних геодинамічних процесів на НДС шару пісковиків з точки зору можливості появи зон високої тріщинуватості та оцінки їх місцезнаходження. На першому етапі досліджень за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) розроблено модель для оцінки НДС шару пісковиків під час геодинамічних процесів.

Пропонована модель ґрунтується на таких допущеннях і спрощеннях.

1. Утворення піщано-алевритової товщі відбувалося в період низької геотектонічної активності, тому як початкове приймаємо горизонтальне розміщення прошарків пісковиків.

2. Також допустимо, що умови формування піщаників у межах досліджуваних ділянок були однакові, тому й початкові фізико-механічні властивості прошарків пісковиків однорідні.

3. Прошарки є настільки протяжні, що їх НДС з достатньою точністю можна описувати як плоский деформований стан.

4. Завдяки своїм реологічним властивостям сусідні прошарки аргілітів і алевrolітів не справляють істотного впливу на НДС шару пісковиків і підлаштовують свою деформацію під деформацію пісковиків.

Для опису плоского деформованого стану достатньою є двовимірною модель. Аналіз можливостей МСЕ для вирішення поставленої задачі дав змогу створити параметричну модель для оцінки НДС прошарку пісковиків. Параметрами моделі є товщина прошарку  $h$ , довжина активної ділянки  $L$ , висота підйому ділянки  $H$ , основні фізико-механічні характеристики матеріалу, а також граничні умови.

Базовими фізико-механічними характеристиками матеріалу є модуль пружності  $E$ , коефіцієнт Пуассона  $\mu$ , границі міцності за стиску  $\sigma_m^c$  та розтягу  $\sigma_m^p$ . Для досліджень приймаємо  $E = 10^4$  МПа;  $\mu = 0,25$ ;  $\sigma_m^c = 800$  МПа;  $\sigma_m^p = 80$  МПа. Високі показники границь міцності вибрано з урахуванням умови об'ємного стиску ділянки породи.

Граничні умови для моделей типу «відома деформація – невідомі напруження» мають велике значення щодо отримання адекватних результатів, тому їх формування потребує ретельного аналізу. З точки зору колекторних властивостей нас найбільше цікавить утворення антикліналі. Проведений аналіз дав змогу сформулювати для висхідної гілки антикліналі граничні умови, наведені на рис. 1. На лівому торці граничними умовами **A** є вільне переміщення тільки вздовж осі  $x$  без можливості повороту чи руху вздовж осі  $y$  вгору-вниз. Такі параметри вільності є характерними для підосви антикліналі при поздовжньому переміщенні товщі. На правому торці умови **B** мають такі показники: фіксоване зна-

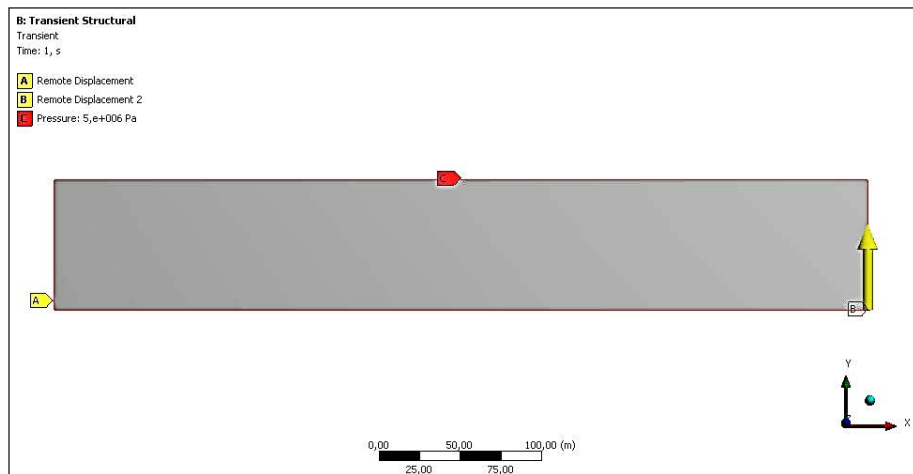


Рис. 1. Граничні умови моделі утворення антикліналі

чення переміщення вгору (параметр висота підйому ділянки  $H$ ) без можливості повороту чи руху вздовж осі  $x$  вліво-вправо. Це імітує стан перерізу місця перегину склепіння антикліналі. Умова  $C$  – умова об'ємного стиску ділянки з фіксованим значенням  $p$ . У даному випадку  $p = 5$  МПа.

Оскільки в модулі *Static Structural*, який традиційно використовується для таких задач,

не підтримуються великі переміщення з такими граничними умовами, то модель побудовано в модулі *Transient Structural*. Даний модуль дає змогу параметр  $H$  задавати як лінійну функцію в часі в табличній формі. Розв'язок задачі відбувається шляхом поетапного наближення до остаточного рішення. Це вирішує проблему великих переміщень.

Параметром для оцінювання НДС ділянки вибрано *Safety Factor (SF)*. Даний параметр визначають за рівнянням

$$SF = \frac{[\sigma]}{\sigma_{eq}},$$

де  $[\sigma]$  – гранично допустиме напруження;

$\sigma_{eq}$  – еквівалентне напруження згідно з вибраною гіпотезою міцності.

Для таких крихких матеріалів як пісковик з суттєво різною границею міцності на стиск і розтяг найбільш прийнятною є гіпотеза міцності Мора, згідно з якою міцність забезпечується за умови

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \nu\sigma_3 \leq [\sigma] = \sigma_M^p,$$

$$\text{де } \nu = \frac{\sigma_M^p}{\sigma_M^c};$$

$\sigma_1, \sigma_3$  – головні напруження.

Зрозуміло, що висока тріщинуватість ділянки буде при  $SF < 1$ .

У даній роботі за допомогою розробленої моделі нами досліджено НДС антикліналі з точки зору впливу її геометричних параметрів на місце знаходження зон високої тріщинуватості та їх відносну поширеність за критерієм  $SF$ . При цьому за граничні стани прийнято такі значення: *max SF* = 0,8 (початок утворення зон тектонічної тріщинуватості) та *min SF* = 0,1 (практично повне руйнування). Деякі результати досліджень за довжини ділянки  $L = 500$  м наведено на рис. 2, 3.

Як бачимо з рис. 2, 3 товщина прошарку пісковика за однакових інших умов суттєво впливає на його НДС під час утворення антикліналі. Результати досліджень для товщини прошарку від 1 м до 80 м наведено на рис. 4.

Згідно з рис. 4 товщина прошарку практично не впливає на мінімальну висоту антикліналі, але суттєво впливає на максимум.

**Висновки і пропозиції.** Утворення зон високої трі-

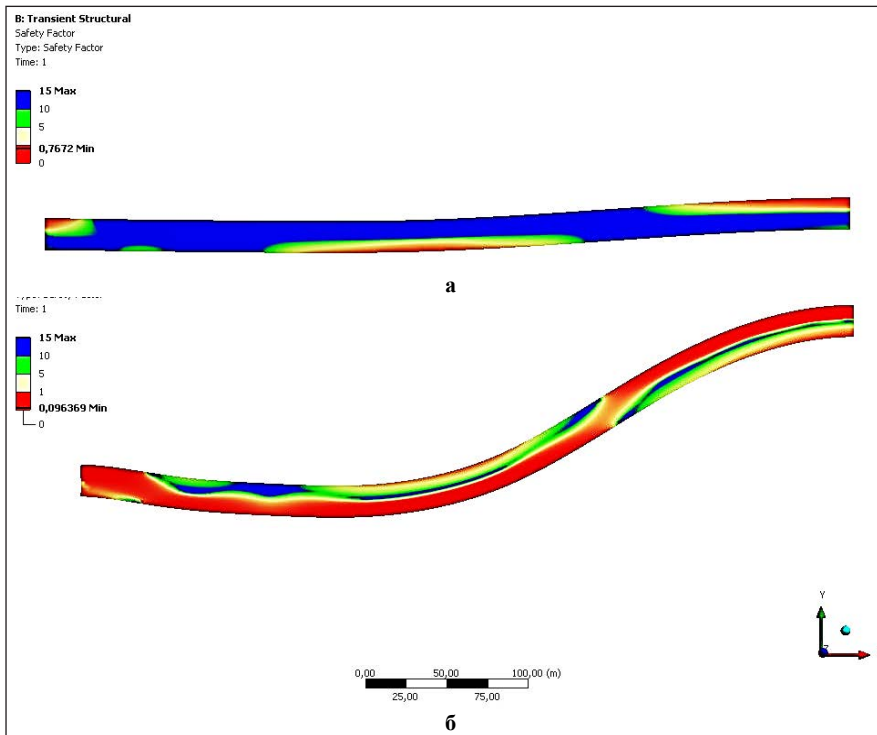


Рис. 2. НДС ділянки антикліналі з параметрами  $L = 500$  м;  $h = 20$  м за граничних значень висоти підйому: а –  $\min H = 13$  м; б –  $\max H = 100$  м

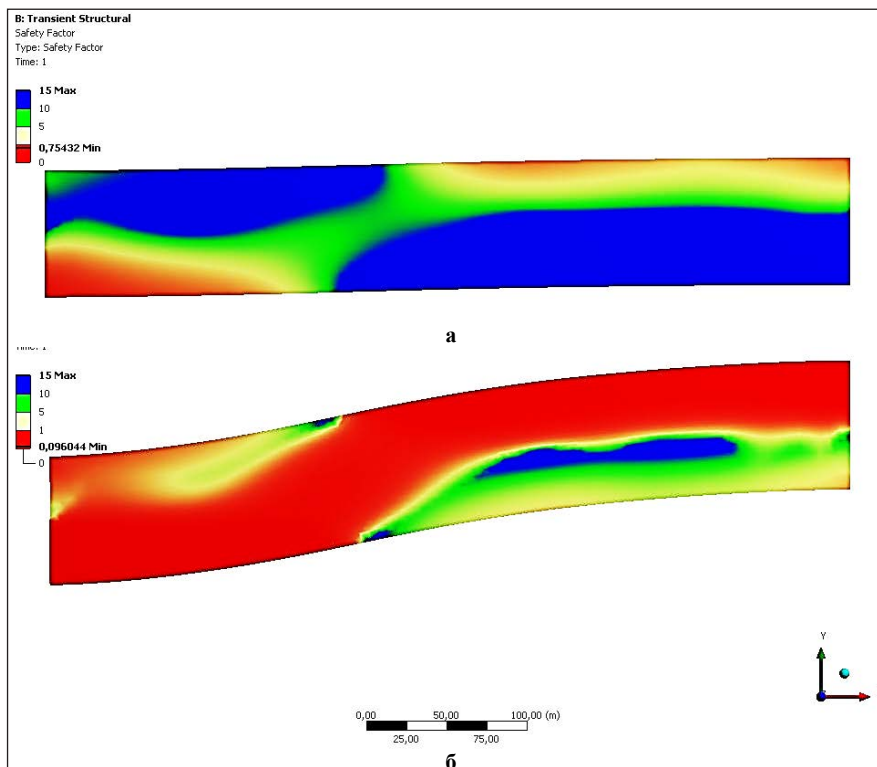


Рис. 3. НДС ділянки антикліналі з параметрами  $L = 500$  м;  $h = 80$  м за граничних значень висоти підйому: а –  $\min H = 8$  м; б –  $\max H = 60$  м

щинуватості у піщано-алевритовій товщі в першу чергу залежить від напружено-деформованого стану прошарків пісковиків.

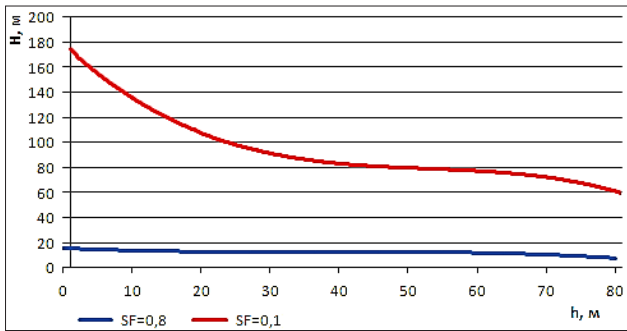


Рис. 4. Результати досліджень НДС прошарку пісковиків в антикліналі ( $L = 500$  м)

Активні геодинамічні процеси через зміну напружено-деформованого стану обумовлюють

можливість появи зон високої тріщинуватості шару пісковиків та оцінки їх місцезнаходження.

Важливо відзначити, що для гірських порід, спостерігається значний розкид величин механічних характеристик. Це пояснюється тим, що на механічні властивості окремих груп впливає не тільки мінералогічний склад, але і їх будова. Тому наступні дослідження будуть спрямовані на статистичну оцінку впливу значень механічних характеристик на тектонічну тріщинуватість шарів пісковиків.

Саме виявлення таких високотріщинуватих зон, так званих зон розуцільнення в межах локальних об'єктів може підвищити ефективність геологорозвідувального буріння. Такі об'єкти є більш привабливими з точки зору прогнозування нафтогазоносності надр, а врахування існування відкритих тріщин дає змогу з більшою ефективністю прогнозувати нафтогазоперспективність тієї чи іншої структури.

## Список літератури:

1. Бойко Г.Е. Тектоногенез и нефтегазоносность осадочных бассейнов / Г.Е. Бойко. – К.: Наук. думка, 1989. – 204 с.
2. Маєвський Б.Й. Прогнозування перспектив нафтогазоносності глибоко занурених горизонтів Передкарпатського прогину з використанням геологостатистичного моделювання / Б.Й. Маєвський, В.Р. Хомин, Т.В. Здерка [et al.] // Геоінформатика. – 2007. – № 1. – С. 54-61.
3. Маєвський Б.Й. Математична модель оцінки тріщинуватості порід-колекторів в умовах їх згину та її практичне застосування (на прикладі менілітових відкладів Передкарпатського прогину) / Б.Й. Маєвський, С.С. Куровець // Теоретичні та практичні аспекти геоінформатики. – Київ. – 2007. – С. 137-148.
4. Lithogenetic fracturing of Oligocene reservoir-rocks of the pre-Carpathian depression / B.Y. Mayevskiy, T.V. Zderka, S.S. Kurovets, A.V. Yarema // Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research. – 2010. – № 16 – P. 53-59.
5. Hydrocarbons genesis and formation of their deposits as a basis of predicting oil-and-gas presence in deep-sunk horizons of sedimentary basins / B.Y. Mayevskiy, S.S. Kurovets // Eastern European Research Journal. – 2016 – № 4(8). – P. 140-158.
6. Дослідження особливостей нафтонасичення олігоценових порід-колекторів Микуличинського нафтового родовища Передкарпатського прогину / Б.Й. Маєвський, І.Т. Штурмак, Т.В. Здерка і ін. // Нафтова і газова промисловість. – 2008. – № 1. – С. 7-10.

**Артым И.В.**

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

## ОЦЕНКА ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

### Аннотация

Показано, что одним из перспективных методов оценки трещиноватости пород-коллекторов есть анализ их напряженно-деформированного состояния путем математического моделирования геодинамических процессов в песчанисто-алевритовой флишевой толще. Разработана с помощью метода конечных элементов параметрическая 2D модель для исследования тектонической трещиноватости песчанисто-алевритовой толщи, обусловленной геодинамическими процессами. Параметрами модели является толщина прослойки, длина активного участка, высота подъема участка, основные физико-механические характеристики материала, а также предельные условия. Исследовано влияние данных параметров на напряженно-деформированное состояние слоя песчаника с точки зрения возможности появления зон высокой трещиноватости и оценки их местонахождения. Результаты данных исследований дадут возможность качественнее прогнозировать высокопроницаемые зоны формирования вторичных коллекторов, что позволит производить вторичный поиск скопления нефти и газа в Западноукраинском нефтегазоносном регионе.

**Ключевые слова:** песчаник, коллектор, трещиноватость, геодинамические процессы, параметрическая 2D модель, метод конечных элементов.

**Artym I.V.**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

## **EVALUATION OF RESERVOIR ROCKS TECTONIC FRACTURING THROUGH THE FINITE ELEMENT METHOD**

### **Summary**

It is shown that one of the promising methods for estimating reservoir rocks fracturing is an analysis of their stress-strain state by mathematical modeling of geodynamic processes in the sandy flysh strata. The parametric 2D model by finite element method is developed with the aim of sandy strata tectonic fracturing researches due to geodynamic processes. Parameters of the model are the thickness of the layer, the length of the active site, the height of the area, the basic physical and mechanical characteristics of the material, as well as the boundary conditions. The influence of these parameters on the stress-strain state of the sandstone layer is researched. It is researched from the point of view of the high fracturing areas appearance possibility as well as their location estimation. The results of these studies will make it possible to better predict the high permeability zones for the epigenetic reservoirs formation. This will allow conducting the secondary explorations of the oil and gas accumulation within the oil-and-gas-bearing province of Carpathians.

**Keywords:** sandstone, reservoir rock, fracturing, geodynamic processes, parametric 2D model, finite element method.