

УДК 622.833.5:622.243

О. В. Бандурина, к.т.н., с.н.с

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГІРСЬКИХ ПОРІД НАВКОЛО ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН

Наведено результати аналізу науково-технічної літератури, присвяченої розрахунку напружено-деформованого стану гірських порід навколо глибоких свердловин. Виділено актуальне завдання з прогнозування поведінки масиву порід навколо глибоких свердловин.

Ключові слова: *глибока свердловина, розподіл напружень, напружено-деформований стан, гірська порода.*

УДК 622.833.5:622.243

Е.В. Бандурина, к.т.н., с.н.с.

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН

Приведены результаты анализа научно-технической литературы, посвященной расчету напряженно-деформированного состояния горных пород вокруг глубоких скважин. Выделена актуальная задача по прогнозированию поведения массива пород вокруг глубоких скважин.

Ключевые слова: *глубокая скважина, распределение напряжений, напряженно-деформированное состояние, горная порода.*

UDC 622.833.5:622.243

O.V. Bandurina, Ph.D., Senior Researcher

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

CURRENT STATE OF THE PROBLEM ANALYSIS STRESS-STRAIN STATE ROCK AROUND DEEP WELL

The results of analysis of scientific and technical literature, which is dedicated to the calculation of the stress-strain state of rock around deep wells. Highlight important task to predict the behavior of rock mass around deep wells.

Key words: *deep well, stress distribution, the stress-strain state, rock.*

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Успішність освоєння й експлуатації нафтогазових свердловин, а також розвідки родовищ нафти та газу значною мірою визначається ефективністю буріння свердловин. А у зв'язку з необхідністю проведення розробки родовищ на значних глибинах зростає актуальність проблеми забезпечення стійкості стовбура свердловин, тому що ефективність буріння таких свердловин багато в чому залежить від стану і стійкості гірських порід їх стовбура та пристовбурної зони. Забезпечення тривалої стійкості порід за цих умов можливе лише при всебічному вивченні й розумінні складних процесів, що відбуваються в гірських породах під спільною дією значних напружень бічного гірського тиску та взаємодії бурового розчину з породою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковане розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значні досягнення у вивченні напружень і деформацій гірських порід навколо розвідувальних та експлуатаційних вертикальних свердловин, значна кількість питань впливу тектонічних процесів у гірському масиві на розподіл текучих напружень у безпосередньому наближенні до вертикальної свердловини залишаються не з'ясованими [1 – 5]. Дослідженням проблем аналізу напружено-деформованого стану (НДС) глибоких свердловин присвячені роботи В.І. Карьова, Є.І. Шемякіна, І.Л. Черняка, І.К. Фоменка, А.М. Папуші, Є.М. Барановського, В.М. Стасенка [1 – 12]. На сьогодні є низка рішень з урахуванням тих або інших властивостей масиву (анізотропії, неоднорідності, фактора часу тощо).

Аналіз профілю стовбура свердловин на площах показав, що частіше ускладнення виникають унаслідок порушення стійкості стінок свердловин. Через це свердловини не досягають проектних глибин і підлягають ліквідації. При цьому лишаються невиправданими економічні витрати на будівництво глибоких свердловин.

Значну цікавість для оперативного прийняття рішень при бурінні свердловин та їх проектуванні являють закономірності розподілу напружень у пристовбурній зоні глибокої свердловини.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Тому метою роботи є проведення аналізу науково-технічної літератури, присвяченої розрахунку НДС гірських порід навколо глибоких свердловин, і виділення актуальних завдань з прогнозування стану масиву порід навколо глибоких свердловин.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Проблеми буріння глибоких розвідувальних свердловин у Дніпрово-Донецькій западині полягають в тому, що досить часто виникають ситуації, коли стає технічно

неможливим і економічно не вигідним подальше продовження бурових робіт. На основі значної вибірки фактичних даних досліджено, що ускладнення та аварії, ліквідація яких вимагає значних матеріальних витрат, викликаних насамперед проявами розбурювання гірського масиву, і виникають здебільшого внаслідок його незрівноваженості. Практично жодну зі свердловин завглибшки понад 5500 м не пробурено без ускладнень і аварій.

З причини невизначеності реального поточного напружено-деформованого стану та неврахування його під час нормування густини промивних рідин, як у процесі проектування, так і буріння свердловин, гірський масив завжди є нерівноваженим. Він завжди є неоднорідним як за своєю будовою, так і властивостями порід. Напружено-деформований стан порід у масиві в одних і тих самих стратиграфічних горизонтах можуть мати різну величину, що на стадії розроблення проектів з буріння передбачити неможливо. Тому й виникає необхідність оцінювання та прогнозування НДС.

Прогнозування діючих напружень у масивах порід має велике практичне значення, тому що ці компоненти разом з фізико-механічними і реологічними властивостями гірських порід є базою для розрахунку стійкості стінок незакріплених стовбурів свердловин. Відповідні розрахунки виконують при оцінюванні продуктивності пластів до проведення випробувань, обґрунтуванні раціональності прийнятої схеми руйнування порід на вибої та надійності ізоляції продуктивних пластів від водоносних після цементування обсадної колони. Головним чинником, що визначає стійкість стовбура свердловини, є його напружений стан залежно від величини зовнішнього впливу (P_1, P_2, P_r), тиску пластового флюїду і фізико-механічних властивостей порід за умов їх залягання.

При вивченні НДС масиву, що не втратив суцільності, широко застосовуються методи механіки деформівних середовищ, зокрема теорії пружності, пластичності, повзучості тощо. Наукові основи аналізу НДС гірських порід містять роботи О.К. Ангелопулу, Б.В. Байдюка, В.С. Войтенка, А.А. Гайворонського, В.Д. Городнова, Х. Фекета, Б.С. Філатова, С.А. Христіановича, Л.А. Шрейнер, Р.М. Ейгелеса, Р.С. Яремійчука та інших. Останнім часом відбувається інтенсивне накопичення інформації щодо впливу різних факторів на НДС гірських порід навколо свердловини й удосконалення методів досліджень [6]. Методи дослідження НДС гірських порід навколо глибоких і надглибоких свердловин можна поділити на аналітичні, числові, методи фізичного моделювання (рис. 1).

НДС у пружній постановці задачі навколо вертикального стовбура свердловини проаналізовано А.М. Динником у 1926 р. Більш детальне розв'язання задачі для незакріпленого стовбура отримано С.Г. Лехницьким (1937 р.).

Пружно-пластичний напружено-деформований стан масиву навколо вертикальної виробки розглянув Р. Феннер (1938 р.). А. Лабас (1949 р.) запропонував розглядати стан порід у зруйнованих зонах навколо виробок як сипуче середовище, що характеризується внутрішнім тертям і зчепленням.

Якщо розглядати масив, у якому ще немає гірничих виробок, як однорідний та ізотропний з горизонтальною поверхнею і враховувати лише гравітаційні сили, то в ньому будуть діяти початкові нормальні напруження: $\sigma_z = \gamma H$; $\sigma_x = \sigma_y = \xi \gamma H$, де H – глибина від поверхні; γ – об’ємна вага; ξ – коефіцієнт бічного розпору масиву гірської породи. Початкові дотичні напруження дорівнюють нулю. Тому початкові напруження являють собою головні нормальні напруження, а осі z , x , y – головні осі.

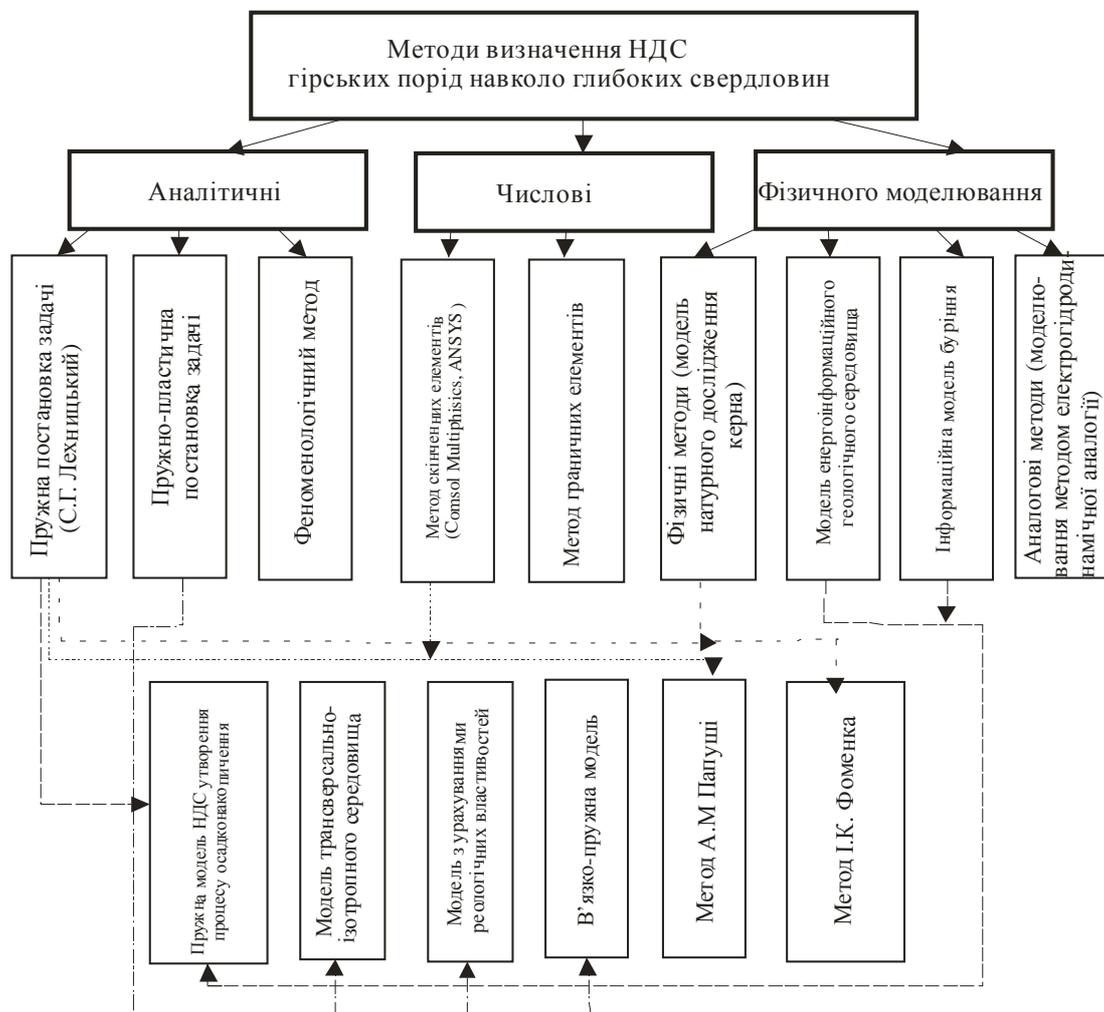


Рис. 1. Класифікація методів визначення НДС гірських порід навколо глибоких і надглибоких свердловин

Головні напруження σ_{rr} поблизу свердловини зменшуються порівняно з напруженнями в непорушному масиві, а напруження $\sigma_{\nu\nu}$ можуть значно зростати чи змінювати знак, викликаючи небезпечне зусилля розтягу. Головні нормальні напруження, спрямовані паралельно (або майже паралельно) осі виробки, далеко від вибою практично не змінюються. Концентрація напружень $\sigma_{\nu\nu}$, як правило, неоднакова в різних точках поверхні виробки й значно зростає в кутах і заокругленнях малого радіуса кривизни. Якщо концентрація напружень не надто велика, то напруження $\sigma_{\nu\nu}$ мають загальну тенденцію до зменшення при віддаленні від свердловини, а σ_{rr} – до зростання (рис. 2) [2, 3].

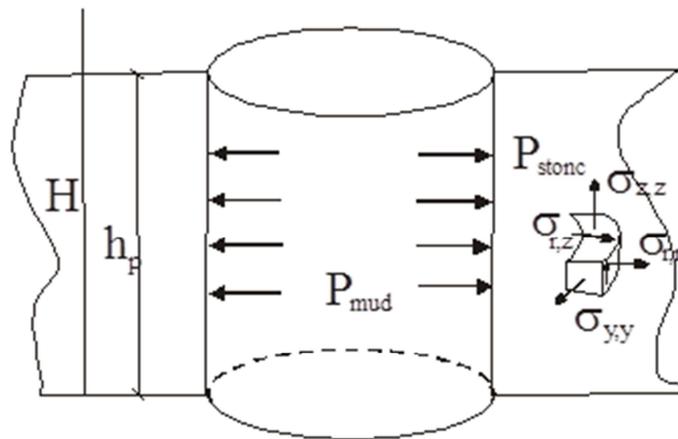


Рис. 2. Розрахункова схема задачі С.Г. Лехницького

Карьовим В.І. розглянуто НДС навколо свердловини і його зміну при збільшенні депресії для різних варіантів конструкції вибою: відкритий стовбур, обсаджений стовбур, наявність перфорації, горизонтальних, вертикальних щілин. Наведено опис експериментальної установки – випробувальної системи тривісного незалежного навантаження, на якій здійснювалося фізичне моделювання процесів, що відбуваються навколо свердловини при виконанні технологічних операцій, і досліджувався вплив зміни напружень на фільтраційні властивості різних типів порід. До розбурювання свердловини на скелет породи продуктивного пласта діють початкові ефективні напруження, які за абсолютною величиною дорівнюють різниці між гірничим тиском і початковим тиском пластового флюїду. Після буріння свердловини в навколосвердловинному просторі відбувається перерозподіл напружень. Радіальні напруження падають, кільцеві зростають, осьові залишаються постійними.

Можливі два основних варіанти конструкції свердловини: відкритий стовбур і обсаджений стовбур. Напруження в ґрунтовому скелеті, що виникають навколо відкритого стовбура свердловини, визначають відомим з теорії пружності розв'язанням задачі Ламе для циліндричної порожнини,

що перебуває під дією зовнішнього і внутрішнього тисків. При цьому порожнина заповнена рідиною:

$$s_r = -(q + p_c)(R_c / r)^2 + q + p(r)(1 - \delta); \quad (1)$$

$$s_\theta = (q + p_c)(R_c / r)^2 + q + p(r)(1 - \delta); \quad (2)$$

$$s_z = q + p(r)(1 - \delta), \quad (3)$$

де s_r, s_θ, s_z – компоненти напружень у радіальному, тангенціальному та осьовому напрямках; q – гірський тиск ($q < 0$; p_c – тиск у свердловині; $p(r)$ – тиск на відстані r від свердловини ($p, p_c > 0$); R_c – радіус поперечного перерізу свердловини; δ – частка площі контакту відносно всієї поверхні зерен ґрунтового скелета.

Максимальні дотичні напруження $\tau = 1/2(s_r - s_\theta)$ дорівнюють $\tau = -(q + p_c)(R_c / r)^2$.

Для багатьох гірських порід характерна анізотропія пружних властивостей, пов'язана з їх шаруватою структурою, наявністю тріщинуватості. Для таких порід пружні та деформаційні характеристики в напрямку, перпендикулярному шарам, можуть значно відрізнитися від характеристик у площинах нашарування. Такі породи можуть бути описані як трансверсально ізотропне середовище. Деформування трансверсально-ізотропного пружного матеріалу характеризується п'ятьма незалежними пружними константами: E, E' – модулі Юнга в площині ізотропії та перпендикулярно їй; ν, ν' – коефіцієнти Пуассона в площині ізотропії та перпендикулярно їй; G' – модуль зрушення для будь-якої площини, що перпендикулярна площині ізотропії.

Як показали численні експериментальні дослідження, для більшості гірських порід можна вказати наближену формулу, що пов'язує модуль зрушення з рештою пружних констант, $G' \approx \frac{EE'}{E(1+2\nu') + E'}$. Для трансверсально ізотропного середовища рекомендовано такі значення пружних модулів: $E/E' = 2$; $\nu = \nu' = 0,2$; $G' = 0,53E'$. Карьов В.І. установив, що наявність анізотропії з урахуванням наближеної залежності незначно впливає на напруження. Тому при аналізі НДС навколо свердловини, що має довільну конструкцію забою, розрахунки можна виконувати для ізотропного середовища [1].

Методи дослідження НДС, запропоновані І.К. Фоменком, включають узагальнення досвіду математичного моделювання НДС масивів анізотропних гірських порід і застосування одного з чисових методів розв'язання задач теорії пружності анізотропних середовищ – методу граничних елементів із широким використанням ПЕОМ. У загальному випадку для визначення напружень у виділеному гірському масиві відомі

випадки застосування методу скінченних елементів (МСЕ) при конкретних граничних умовах, наприклад пакет програм ANSYS та COMSOL Multiphysics [4]. Глобальні напруження гірського масиву вносять істотні зміни у розподілення локальних напружень біля вертикальної найбільш глибокої свердловини (близько 8000 м). Однак випадки проведення таких досліджень для свердловин глибиною 3000 – 4000 м невідомі. У той же час автором доведено, що для оцінювання НДС на стінці свердловини достатньо одних лише класичних методів розрахунку.

Для визначення НДС глибоких свердловин здійснювалося моделювання стану породи в подібних умовах як фізичними, так і аналоговими методами. До перших відносять, зокрема, моделювання на еквівалентних матеріалах, відцентрове моделювання та метод фотопружності, до аналогових – моделювання методом електрогідродинамічної аналогії (ЕГДА).

Наприклад, моделювання фізико-хімічного впливу бурового розчину на НДС гірських порід біля свердловини може здійснюватися як безпосередньо шляхом зміни діючих напружень, так і опосередковано шляхом впливу на реологічні параметри породи. Це дозволяє кількісно оцінювати вплив різних факторів на напружено-деформований стан гірських порід на підставі випробування мінімальної кількості зразків [7].

Поведінка електричного поля має певною мірою відображати картину НДС гірської породи. Однак не можна очікувати точної кореляції параметрів, тому що електричне поле має специфіку, а тензочутливість його залежить від багатьох особливостей гірської породи.

Потрібно зазначити, що задача моделювання всіх факторів, що визначають НДС масиву гірських порід особливо при контакті з буровими розчинами, мабуть, взагалі нерозв'язна. Моделі невеликих розмірів, які використовуються в цих дослідках, не адекватні поведінці свердловині. Таке моделювання, як зазначив засновник методу Г.М. Покровський (1939 р.), жодною мірою не може претендувати ні на точність, ні на виконання певних законів подібності [7].

Для аналізу геомеханічних процесів використовують фізичне та математичне моделювання. Серед фізичних методів моделювання найчастіше застосовують моделювання на еквівалентних матеріалах і на оптично активних матеріалах. Як показав аналіз експлуатації гірничих виробок у багаторічних мерзлих породах, на стабільність породних оголень істотно впливає тепловий режим вироблення. Тому зміна стану масиву буде залежати тільки від мерзлого чи талого стану гірських порід. За наявності площини симетрії в породному масиві розглядається плоска задача. Розв'язуючи завдання в постановці плоскої деформації, необхідно пам'ятати, що рішення буде коректним тільки для перерізів, які в процесі деформування залишаються плоскими [8].

Досліджуючи НДС глибоких свердловин, слід звернути увагу на можливість зниження енергоємності руйнування гірських порід при глибокому бурінні за рахунок використання енергії гірського масиву. Установлено, що на певній глибині свердловини ця енергія досягає таких розмірів, що дає можливість здійснювати ефективне руйнування породи. Є.М. Барановський визначив складові балансу енергії цього процесу, який поклав початок комбінованому руйнуванню породи при бурінні глибоких свердловин. Ефективність буріння залежить від співвідношення питомої механічної енергії руйнування і питомої потенційної енергії зміни об'єму [9, 10].

Відомий комплексний метод оцінювання та прогнозування НДС, який базується на виявленні та використанні феноменологічних закономірностей деформування гірського масиву. Для оцінювання НДС прийнято узагальнений параметр деформування гірського масиву:

$$da_i = \frac{\lg \sum_0^i (A_i^{d_i-1} h_i) / H_i}{\lg \sum_0^i (A_i h_i) / H_i} ; \quad (4)$$

$$A_i = \frac{G_i}{10^8 D_i} ; \quad (5)$$

$$d_i = \frac{\lg v_i / 3600 n_i}{\lg A_i} , \quad (6)$$

де G_i – осьове навантаження на породоруйнівний інструмент, Н; D_i – діаметр породоруйнівного інструмента, м; d – експонента, безрозмірна величина; v_i – механічна швидкість буріння, м/год; n_i – частота обертання породоруйнівного інструмента, s^{-1} ; h_i – проходка на породоруйнівний інструмент, м; H_i – досягнутий (поточний) вибій (глибина) свердловини, м.

Аналітичний моніторинг цього параметра за глибиною буріння свердловини дає можливість оцінювати та прогнозувати напружено-деформований геобаричний стан гірського масиву. Досвід застосування цього методу вказує на необхідність наявності об'єктивної, нескоригованої вхідної фактичної геолого-фізичної інформації. Він заснований на наявності інформації про конкретні гірничо-геологічні умови. Роботи виконують із застосуванням ПЕОМ з відповідним програмним забезпеченням. Відомий феноменологічний метод, в основу якого покладено відношення, що дорівнює відношенню десяткового логарифма градієнта сили для розбурених порід до десяткового логарифма градієнта сили для розбурених порід літологічного бар'єра. Однак він не використовується через відсутність поточної первинної інформації [11].

Для вдосконалення феноменологічного методу застосовано аналітичний метод оцінювання геобарично-механічних параметрів бурінням та метод сейсмозвідки. Основні елементи аналітичного

методу: технічні засоби первинної інформації; модель напруженого стану (з урахуванням пружних властивостей суцільного середовища), утвореного процесом осадко- накопичення гірського масиву; модель руйнування гірського масиву, програмні засоби [12].

При оцінюванні НДС масиву порід навколо глибоких свердловин слід звернути увагу на врахування зміни стану масиву гірської породи навколо свердловини із часом, однак вона розроблена лише для соляних і глинистих порід. Розроблена методика дає змогу експериментально визначити зміну фізико-механічних і реологічних властивостей породи в стадії непружної деформації залежно від напруженого стану [13]. Методика включає:

- визначення швидкості плину соляних та глинистих порід залежно від напруженого стану розкритого пласта;
- визначення міцнісних параметрів соляних і глинистих порід залежно від швидкості непружної деформації;
- прогнозування тиску на колону в часі від моменту перекриття нею непружно-деформованих порід до завершення буріння свердловини.

Відомий метод оцінювання НДС за наявності шару зі зниженими фізико-механічними характеристиками. Наведено методи розрахунку міцності й управління стійкістю вертикальної свердловини за умов просторової вісесиметричної деформації порід пристовбурної зони в межах шару зі зниженими фізико-механічними характеристиками. Як умову міцності використано умову Кулона – Мора, що враховує незворотні об'ємні деформації. У задачі використано положення теорії стійкості в механіці гірських порід, розробленої М.Т. Алімжановим [15, 16]. Однак цей метод розрахунку бажано застосовувати, коли раніше відомо про наявність шару зі зниженими фізико-механічними характеристиками.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямку:

1. Проблема прогнозування напружено-деформованого стану глибоких свердловин досить актуальна і широко досліджена, однак застосування класичних аналітичних підходів розв'язує задачу лише для певних часткових випадків.

2. Використання феноменологічних підходів із застосуванням узагальнених параметрів оцінювання НДС глибоких свердловин вимагає наявності об'єктивної, нескоригованої вхідної фактичної геолого-фізичної інформації, що не завжди можливо.

3. Задовільні результати прогнозування НДС свердловин можуть бути отримані із застосуванням методу скінченних елементів у вже апробованих програмних комплексах у комбінації з класичними розрахунками та фізичним моделюванням, однак розв'язання проблеми таким чином вимагає відповідного наукового рівня фахівців.

4. Питання оцінювання НДС глибоких свердловин залишаються не до кінця вивченими та вимагають певних інженерних методик для оперативного оцінювання стану свердловини [17].

Література

1. Карев, В.И. Влияние напряженно-деформированного состояния горных пород на фильтрационный процесс, и дебит скважин: автореф. дис. на соискание учен. степени д-ра технических наук 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела // В.И. Карев. – Санкт-Петербург, 2010. – 34 с.
2. Шемякин, Е.И. Новые методы расчета нагрузок на крепи / Е.И. Шемякин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1976. – № 3. – С. 123 – 127.
3. Черняк, И.Л. Предотвращение пучения почвы горных выработок / И.Л. Черняк. – М., 1978. – 146 с.
4. Фоменко, И.К. Математическое моделирование напряженного состояния инженерно-геологического массива, сложенного анизотропными горными породами: на примере околоствольного массива Кольской сверхглубокой скважины: автореф. дис. на соискание науч. степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» // И.К. Фоменко. – Москва, 2001. – 139 с.
5. Папуша, А.Н. К вопросу расчета напряженно-деформированного состояния горного массива в окрестности сверхглубокой вертикальной скважины / А.Н. Папуша, Д.П. Гонтарев // Вестник МГТУ. – №5. – 2010. – С 81 – 93.
6. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела // С.Г. Лехницкий. – М: Изд-во Наука, 1977. – 73 с.
7. Алимжанов, А.М. Напряженно-деформированное состояние вокруг глубоких скважин в условиях неоднородности механических свойств пород приствольной зоны: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. физико-математических наук, 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела // А.М. Алимжанов. – Новосибирск, 1994. – 32 с.
8. Иудин, М.М. Напряженно-деформированное состояние мерзлого массива пород вокруг вертикального ствола // М.М. Иудин. – Якутск: ЯГУ, 1997. – 26 с.
9. Барановський, Е.М. Головне завдання геомеханіки у вирішенні проблем глибокого буріння / Е.М. Барановський, В.М. Мойсишин // Розвідка та розробка нафти і газ. родовищ. – 2006. – № 4. – С. 5 – 9.
10. Барановський Е.М. Комбіноване руйнування гірських порід при бурінні глибоких свердловин / Е.М. Барановський, В.М. Мойсишин // Наук. вісн. Івано-Франків. нац. техн. ун-ту нафти і газу. – 2006. – № 1. – С. 26 – 30.
11. Стасенко, В. М. Проблеми оцінювання та прогнозування геобаричного та напружено-деформованого стану гірського масиву під час буріння глибоких нафтових і

газових свердловин / В.М. Стасенко, В.М. Карпенко, М.І. Козаченко // *Нафтова і газова промисловість*. – 2008. – №2. – С. 20 – 22.

12. Стасенко, В.М. Техніка і технологія оцінювання та прогнозування геобаричного та напружено-деформованого стану гірського масиву під час буріння глибоких нафтових і газових свердловин / В.М. Стасенко, В.М. Карпенко, М.І. Козаченко // *Нафтова і газова промисловість*. – 2008. – №3. – С. 21 – 25.

13. Дослідження напружено-деформованого стану масиву навколо свердловини зі змінними у часі міцнісними властивостями порід / П.І. Світалка, В.В. Соловійов, М.П. Нестеренко, О.В. Бандуріна // *Науковий журнал (Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка.; Редколегія: В.О. Онищенко (головний редактор) та ін. – Вип. 1 (1). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – С.144 – 148.*

14. Карев, В.И. Геомеханика нефтяных и газовых скважин / В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко // *Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И.Лобачевского*. –2011.– №4.– Ч.2. – С. 448 – 450.

15. Alimzhanov, M.T. *Methods of continuum nonlinear mechanics in problems of rock pressure control at drilling deep Holes* / M.T. Alimzhanov // *Advances in Mechanics, Int.Jour., Warsaw, 1992 – Vol.15. – № 3 – 4. – P. 41 – 69.*

16. Алимжанов, А.М. Пространственная осесимметричная устойчивость вертикальной скважины в массиве, содержащем слой с пониженными прочностными свойствами [Электронный ресурс] / А.М. Алимжанов. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Alimzhanov/Alimzhanov_1.pdf

17. Блохін, В.С. Інтенсифікація будівництва глибоких нафтогазових свердловин / В.С. Блохін, О.В. Бандуріна // *Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції «Інноваційні технології буріння свердловин, видобування нафти і газу та підготовки фахівців для нафтогазової галузі», 3 – 6 жовтня 2012 р. м. Івано-Франківськ. – Івано-Франківськ, 2012. – С. 67 – 70.*