

УДК 622.831.31

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.144.004>

**ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ГАЗОВИХ РОДОВИЩ ЧЕРЕЗ
УПРАВЛІННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИМ СТАНОМ ПОРІД
ПРИВИБІЙНОЇ ЗОНИ СВЕРДЛОВИН**

¹Булат А.Ф., ¹Слащов І.М., ¹Слащова О.А., ¹Макеев С.Ю., ¹Рижов Г.О.

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЧЕРЕЗ
УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ
ПОРОД ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ СКВАЖИН**

¹Булат А.Ф., ¹Слащев И.Н., ¹Слащева Е.А., ¹Макеев С.Ю., ¹Рыжов Г.А.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

**IMPROVEMENT OF GAS FIELD EFFICIENCY THROUGH THE
CONTROLLING OF ROCK STRESS-STRAIN STATE IN THE BORE-HOLE
WORKING AREA**

¹Bulat A.F., ¹Slashchov I.M., ¹Slashchova O.A., ¹Makeiev S.Yu., ¹Ryzhov H.O.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine

Анотація. Фільтрація газу в породному масиві визначається наявністю в них пов'язаних пір, мікротріщин і тріщин, тому вирішальну роль відіграють діючі в породі напруження, зміни яких можуть призводити як до збільшення проникності, так і до її зменшення. Крім того може відбуватися явище компакції – механічного просідання пласта в результаті зменшення пластового тиску, яке перебиває дебіти свердловин і вимагає невідкладних заходів щодо підвищення проникності породного масиву. Зниження дебітів свердловин супроводжується великими витратами коштів. Тому управління напружено-деформованим станом породного масиву і процесом утворення тріщин навколо робочої частини свердловин шляхом обґрунтування форми поверхні свердловини є актуальною науковою задачею. Мета роботи: підвищення ефективності родовищ газу за рахунок обґрунтування конструктивних параметрів робочої зони експлуатаційних свердловин. Методи досліджень: систематизація наукових публікацій і експериментальних даних, математичне моделювання методом скінченних елементів і початкових напружень, методи інженерного конструювання тривимірних об'єктів.

Подальший розвиток отримала геофільтраційна модель транзиту вільних газів в експлуатаційні свердловини, яка відрізняється урахуванням закономірностей зміни напружено-деформованого стану та об'ємів порово-тріщинного простору навколо робочої зони свердловин довільної конфігурації. Вперше запропоновано співвідношення для оцінки передбачуваних об'ємних витрат газу, що надходить у свердловину, на базі оцінки методом скінченних елементів приросту кульової частини тензора деформацій і об'ємів зруйнованих елементів геомеханічної моделі. Визначено взаємозв'язки між встановленими геомеханічними параметрами руйнування гірських порід (градієнтами тисків, поширеністю зон непружних деформацій, тріщиною пористістю і розкриттям систем тріщин) навколо робочої зони свердловин довільної конфігурації і продуктивністю газової свердловини.

Проведено математичне моделювання робочої зони свердловини без профілювання її поверхні і при різних способах профілювання. Встановлено, що вибір раціональної конфігурації робочої зони свердловин дозволяє, по-перше, інтенсифікувати процес розтріскування порід, що істотно підвищує їх проникність і дебіт, по-друге, змістити зону підвищених напружень від стінок свердловини вглиб породного масиву, що підвищує їх стійкість. Зіставлення розподілів напружень дозволило виявити переваги та недоліки цих технологій, оскільки підвищені концентрації напружень при нарізці циліндрів і більш рівномірне поле напружень в разі гвинтової різьби дають можливості різного впливу на породу і відповідно впливають на процеси її руйнування. Показано, що зміною форми робочої частини газової свердловини можна управляти напружено-деформованим станом навколишніх порід, підвищувати їх тріщинуватість і активізувати дебіт газу. Розроблено новий пристрій для профілювання і створення поверхні робочої частини свердловин довільної конфігурації.

Ключові слова: газове родовище, привибійна зона свердловин, моделювання напружено-деформованого стану порід, геофільтраційні методи, способи активізації дебіту свердловин

Україна має значні запаси природного газу. Близько 85 % запасів газу зосереджено в східному регіоні. При цьому на західний і південний регіони припадає відповідно 10 % та 5 %. Родовища західного регіону багато-пластові, з

великою продуктивною товщею (до 600 м), дуже низькими колекторними властивостями (пористість 6-15 %, проникність 0,001-0,020 мкм²). Родовища східного регіону відрізняються більш сприятливими умовами розробки [1, 2]. У багатьох пластах пористість порід досягає 20-23 %, проникність до 1,00 мкм² і вище (категорія добре і дуже добре проникні), товщина пластів змінюється від 3-5 м до 20-30 м, часто мають місце активні підшовні і контурні води, що підвищує ефективність розробки.

Метод буріння нафтових та газових свердловин залежить від розташування газонасиченого пласта. Буріння може бути вертикальним, горизонтальним або похилим. Сучасні технології видобутку газу багато в чому засновані на бурінні похилих і горизонтальних свердловин. Однак з їхнім використанням виникли серйозні проблеми. Ускладнення при бурінні газових свердловин пов'язані з втраченою стійкістю стовбурів, що супроводжується великими витратами коштів на ліквідацію цих наслідків. Крім того може відбуватися явище компакції – механічного просідання пласта в результаті зменшення пластового тиску, яке перекриває дебіти свердловин і вимагає невідкладних заходів щодо підвищення проникності породного масиву. Виявилося, що стійкість стовбурів похилих свердловин істотно залежить від деформаційних і міцнісних характеристик гірських порід, наявності та ступеня їх анізотропії, а також від геометрії отвору. У зв'язку з цим прогнозування і попередження даного виду ускладнень грає важливу роль в зниженні собівартості буріння свердловин, а напружено-деформований стан порід приконтурної частини навколо стовбурів свердловин є одним з основних факторів, що впливає на дебіт свердловин, оскільки газова проникність залежить від тріщинуватості породного масиву. Тому управління напружено-деформованим станом породного масиву і процесом утворення тріщин навколо робочої частини свердловин шляхом обґрунтування форм поверхні свердловин є актуальною науковою задачею.

Мета роботи: підвищення ефективності родовищ газу за рахунок обґрунтування конструктивних параметрів робочої зони експлуатаційних свердловин.

Методи досліджень: систематизація наукових публікацій і експериментальних даних, математичне моделювання методом скінченних елементів і початкових напружень, методи інженерного конструювання тривимірних об'єктів.

Природний газ як правило залягає під великим тиском в пористих гірських породах, насичуючи їх в тій чи іншій мірі. Гірські породи (колектори) здатні утримувати в собі газ та віддавати їх при розробці. Це в основному тріщинуваті пісковики або вапняки, що знаходяться між погано проникними породами, наприклад, глиною, глинистими сланцями, мергелем. Вони спільно утворюють природні резервуари.

Проведено аналіз і систематизація великого об'єму експериментальних досліджень [2] з впливу напружено-деформованого стану на проникність гірських порід. Розглядалися колектори газових родовищ з різних регіонів, різного літологічного складу, що залягають на глибинах від ста метрів до чотирьох кілометрів, з різними коефіцієнтами аномальності пластового тиску. Узагальнюючи результати випробувань, породи з точки зору їх реакції на зміну напружень умовно можна розділити на три категорії.

До першої категорії відносяться щільні міцно зцементовані дрібнозернисті пісковики, аргіліти, доломіт та ін. Ці породи деформуються під дією прикладених напружень чисто пружно. Проникність їх у міру зростання напружень зменшується, але після зняття напружень вона повертається до початкового значення.

Другу категорію складають дрібно-, середньо- і грубозернисті пісковики з невеликим вмістом глини, алевроліти і вапняки. Ці породи при досягненні напруженнями певного рівня (певної величини депресії в свердловині), який залежить від типу породи, умов залягання, пластового тиску та інших чинників, починають деформуватися непружно і проявляти властивості повзучості. В міру зростання непружних деформацій проникність породи значно і необоротно зменшується. Коли деформація досягає певної критичної величини, порода починає розтріскуватися і руйнуватися, що супроводжується різким збільшенням її проникності навіть у порівнянні з початковим значенням.

До третьої категорії відносяться пісковики з великим вмістом глини. Такі породи мають суттєві реологічні властивості та вже при незначних напруженнях починають інтенсивно деформуватися, а проникність їх при цьому різко падає. Однак навіть при значних деформаціях руйнування зразків не настає, вони продовжують пластично деформуватися практично з постійною швидкістю, а проникність їх при цьому поступово необоротно зменшується [2].

На дослідження фільтраційних процесів навколо свердловини і впливу на них напружено-деформованого стану слід звернути особливу увагу. В роботах [3-5] обґрунтовано, що фільтраційні течії в гірських породах визначаються наявністю в них пов'язаних пір, мікротріщин і тріщин, а вирішальну роль відіграють діючі в породі напруження. Зміни цих напружень можуть призводити як до збільшення проникності, так і до її зменшення, причому необоротно. В роботі [5] представлений найбільш сучасний погляд на цю проблему. Запропоновано експериментально-аналітичний метод комплексного аналізу стану газонасиченого породного масиву, який передбачає визначення газопровідних тріщин серією розрахунків ідеалізованих квазістаціонарних станів насиченого газом геосередовища, їх верифікацію за результатами моніторингу в гірничих виробках. Підвищення тріщинуватості, розрихлення породи і необоротне збільшення проникності можна викликати шляхом використання пружної енергії, яка накопичена самою природою – гірським тиском і енергією пластової рідини, здійснюючи спрямоване розвантаження масиву порід.

Явище штучного розтріскування породи і збільшення при цьому її проникності шляхом створення в привибійній (робочій) зоні свердловини (ПЗС) необхідних напружень лягло в основу нових способів підвищення продуктивності нафтових і газових свердловин – методу георихлення. Процес росту тріщин в породах може інтенсифікуватися шляхом використання обґрунтованих параметрів буріння та конструкції робочої зони свердловини (попереднього нарізування щілин, проведення додаткової перфорації відкритого стовбура та інше), чим досягається значне збільшення діючих в робочій зоні свердловини напружень. Таким способом можливо ініціювати процес утворення тріщин і в міцних породах, які погано піддаються руйнуванню, що істотно підвищує їхню проникність і дебіт свердловини. Крім того нарізані щілини зміщують концентрації напружень

вглиб породного масиву від стінок свердловини, що сприяє підвищенню її стійкості.

Для вирішення питання збереження стійкості стінок свердловин і підвищення проникності привибійної зони проведено математичне моделювання з оцінки параметрів геомеханічних процесів, що відбуваються на контурах свердловин і в прилеглих породах. Для визначення напружень та зон непружних деформацій в привибійній зоні свердловини, що має довільну конструкцію забою, використовувався пакет програм ІТМ НАНУ GEO-RS[©] [6, 7]. Математична модель задовольняє основним положенням теорії подібності: фізичній подібності, так як використовуються фізико-механічні властивості одержані лабораторним шляхом; подібності геометричних властивостей систем шляхом масштабування; за подібності початкового стану системи, умов на границях системи і кінематичній подібності відповідають рівновага рівнянь методу скінченних елементів (МСЕ) і методу початкових напружень (МПН).

В основу математичної моделі покладені співвідношення механіки суцільного середовища, теорії граничних і поза межних станів гірських порід [8, 9]:

- умови спільності деформацій для суцільного середовища

$$\varepsilon_x = \frac{du_x}{dx}, \quad \varepsilon_y = \frac{du_y}{dy}, \quad \gamma_{xy} = \frac{du_x}{dy} + \frac{du_y}{dx}, \quad (1)$$

де ε_x , ε_y – нормальні відносні деформації за координатними осями x , y , що визначаються в результаті рішення матриці жорсткості системи МСЕ; u_x , u_y – осьові переміщення; γ_{xy} – деформації поперечного зсуву;

- зв'язок між напруженнями і деформаціями в пружному середовищі для ізотропного однорідного і неоднорідного лінійно деформованого тіла

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{du_x}{dx} + \mu \frac{du_y}{dy} \right), \text{ Па; } \sigma_y = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{du_y}{dy} + \mu \frac{du_x}{dx} \right), \text{ Па; } \quad (2)$$

де E – модуль пружності, Па; μ – коефіцієнт Пуассона;

- умова спільності деформацій і напружень

$$\frac{d^2(\sigma_x - \mu\sigma_y)}{dx^2} + \frac{d^2(\sigma_y - \mu\sigma_x)}{dy^2} = 2(1+\mu) \frac{d^2\tau_{xy}}{dxdy}, \quad (3)$$

де τ_{xy} – напруження зсуву, Па;

- максимальні і мінімальні головні деформації

$$\varepsilon_{1,3} = 0,5 \left[(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \pm \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + 4\gamma_{xy}^2} \right]. \quad (4)$$

Визначення граничних станів породного масиву та використання деформаційної моделі непружного середовища дає можливість максимально наблизити математичну модель руйнування до реальної поведінки гірських порід під дією навантаження. Враховуються дані по структурним і геологічним характеристикам масиву і фізико-механічним властивостям порід, які визначаються: модулем пружності E (Па), коефіцієнтом Пуассона μ , об'ємною вагою порід γ (кг/м³), модулем зчеплення C (Па) і кутом внутрішнього тертя φ (град) для кожного типу елементів.

Максимальні і мінімальні головні напруження в процесі непружного деформування порід визначаються співвідношеннями:

$$\sigma_1 = [\sigma_1] - \left(\frac{\varepsilon_1 - [\varepsilon_1]}{(k-1)[\varepsilon_1]} \right) ([\sigma_1] - \sigma_1^r), \text{ Па};$$

$$\sigma_3 = \frac{E(\varepsilon_1 + \varepsilon_1 \operatorname{ctg} \xi) + 2C \operatorname{ctg}(45 - \varphi/2)(\mu - 1)}{(1 - \mu)(1 + \operatorname{ctg} \xi)}, \text{ Па}; \quad (5)$$

де $[\sigma_1]$, σ_1^r – граничні і залишкові максимальні головні напруження (Па); $[\varepsilon_1]$, ε_1^r – граничні і залишкові максимальні головні деформації; k – коефіцієнт, що характеризує крихкість породи [10]; $\operatorname{ctg} \xi$ – параметр пластичної течії.

Вхідними даними для геомеханічних розрахунків були фізико-механічні параметри для міцних і слабких тріщинуватих піщаників (табл. 1). Використані усереднені значення пружних і міцнісних властивостей порід Донбасу.

Таблиця 1 – Усереднені значення пружних і міцнісних властивостей порід Донбасу (за науковими публікаціями) для формування масиву вхідних даних

Найменування порід	Модуль пружн. $E \cdot 10^{-4}$, МПа	Межа міцн. на стиск $\sigma_{сж}$, МПа	Межа міцн. на розтяг. σ_p , МПа	Зчеплення C , МПа	Угол внутр. тертя φ , град.	Об'єм. вага γ , Т/м ³	Коеф. Пуассона μ
¹ Аргіліти	1,0-4,5	38-110			30		0,17-0,25
⁴ Аргіліти	3,5	26	6,6	13,6	41	2,7	0,29
³ Аргіліти	0,6-1,4	7-70	1-7	4	20	2,45-2,83	0,2-0,25
⁵ Аргіліти тріщ.	1,3	56-150	1-17			2,4	0,33
³ Глинисті сланці	1,6-4,5	14-58				2,58-2,82	0,15-0,27
¹ Глинисті сланці	1,0-4,0						0,22
⁴ Алевроліти	4,42	52	7,9	18,7	33	2,0	0,3
³ Алевроліти	1,5-8,2	25-212	5-18	20	30	2,58-2,89	0,16-0,34
¹ Алевроліти	1,0-3,0	40-100	2,1		25	2,6	0,2-0,3
⁵ Алевроліти тріщ.	0,5	80					0,15
² Піщані сланці	2,61	3					0,15-0,4
¹ Піщані сланці	1,0-3,0	5-83					
³ Пісковики	3,0-8,0	80-310	10-40		22	2,53-2,8	0,13-0,5
² Пісковики	3,52	147	2,7	15,0	38	1,9	0,1-0,3
¹ Пісковики	2,0-4,0	72-100	9	27,0	45	2,55	0,28
⁴ Пісковики	4,47	74		20	30-32	2,4-2,6	0,24-0,25
⁵ Пісковики тріщ.	1,8-2,2						
¹ Вапняки	4,0-8,0	12-25			27		0,27
⁴ Вапняки	5,0	84	10	3	25	2,71	0,2
⁵ Вапняки тріщ.	1,0					2,1	0,2

Примітка. За даними: 1 – І.В. Баклашова [11]; 2 – Б.М. Усаченко [12, 13]; 3 – І.О. Турчанінова [14]; 4 – С.С. Гребенкіна [15]; 5 – Г.Т. Кіричанського [16].

Верхня частина газодобувних свердловин проводиться з обсадними трубами. Робоча частина свердловин, через яку газ надходить з масиву порід, проводиться з перфорованими трубами або, найчастіше, без обсадки.

Математичне моделювання проведено для відкритої робочої частини стовбура, який розташований в пластовому газовому колекторі, тобто для

видобувної частині свердловини. Досліджено вплив розташування повздовж свердловини і конфігурації порожнин на напружено-деформований стан гірських порід та розвиток зон підвищеної тріщинуватості в породах навколо оголення. Результати оцінки напружено-деформованого стану приконтурної зони свердловин розташованих в слабких пісковиках показані на рис. 1.

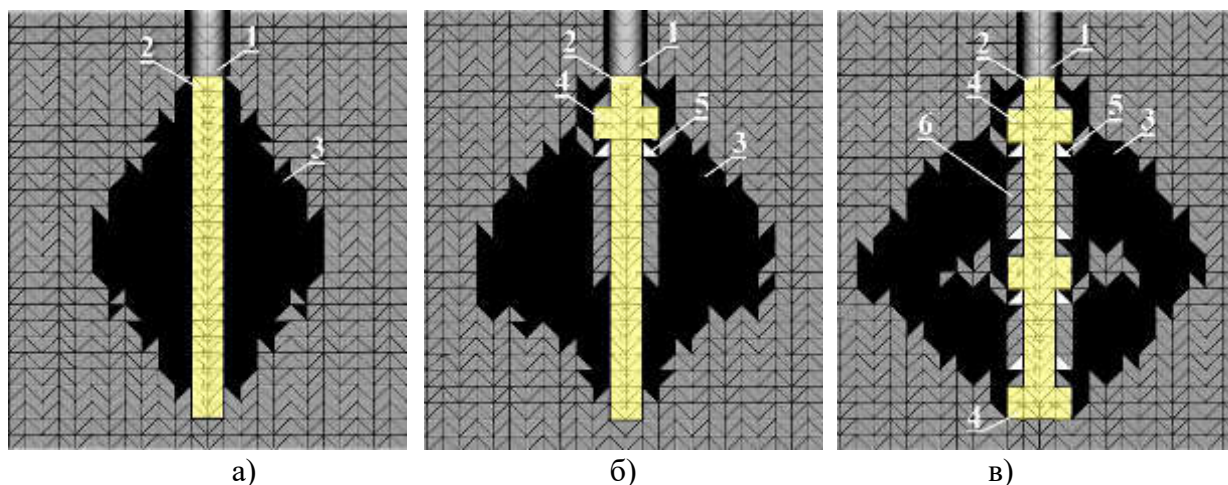


Рисунок 1 – Вплив розташування порожнин в робочій зоні свердловини на розвиток зон підвищеної тріщинуватості навколо газовидобувних свердловин (слабкі тріщинуваті пісковики, глибина 3000 м): а – свердловина без порожнин; б – свердловина з однією порожниною; в – створення декількох циліндричних порожнин; 1 - обсадна труба; 2 – активна частина свердловини; 3 – зони розвитку тріщинуватості; 4 – порожнини циліндричної форми; 5 – зони з розривними порушеннями; 6 – стійкі частини стінок свердловин

Навколо відкритої круглої свердловини (звичайної без порожнин) виникають області підвищених напружень, відповідальних за руйнування порід (рис. 1, а). Тому поруч свердловини утворюється зона розривних порушень (трикутники чорного кольору на рис. 1), які безпосередньо прилягають до оголення свердловини і, відповідно, руйнують її стінки.

Моделювання порожнин циліндричної форми в породах навколо свердловини (1 порожнина, рис. 1, б, та 3 порожнини, рис. 1, в) показало, що застосування порожнин викликає ефект, який характерний при застосуванні розвантажувальних щілин в гірничих виробках. Зони підвищених напружень зміщуються вглиб породного масиву і відсуваються від стінок свердловини. Тому стінки свердловини перестають руйнуватися (сірі елементи – породи знаходяться в пружному незруйнованому стані), а розривні руйнування віддалених частин порід (чорні елементи) сприяють утворенню тріщин і підвищенню проникності масиву й отже ефективності газовидобутку. Кількість зруйнованих елементів в цілому не зменшується, вони просто відсуваються від стінок свердловини. Таким чином одночасно оберігаються стінки свердловини від руйнування і не погіршується проникність масиву порід.

В умовах міцних пісковику картина розподілу зон непружних деформацій змінюється. Буріння циліндрів призводить до руйнування віддаленої частини порід і підвищенню їх проникності (рис. 2, б) при цьому не руйнуючи самих стінок свердловини.

На рис. 3 показано вплив форм порожнин на напружено-деформований стан породного масиву. Встановлено, що створення порожнин в свердловині

віддаляє непружні деформації від стінок свердловини та підвищує її стійкість, а також збільшує зони техногенної тріщинуватості на 20 %, що посилює проникність порід для газу. Слід зазначити, що порожнини з конусоподібною верхньою частиною (рис. 3, б) більш стійкі, так як при їх застосуванні очікувані зони розривних порушень біля стовбура свердловини знижуються в 2 рази.

Розподіл максимальних стискаючих напружень в породному масиві навколо робочої частини свердловини досліджено для умов створення порожнин з використанням технології нарізки циліндрів (рис. 4, а) і технології безперервного буріння з нарізкою гвинтового пазу (рис. 4, б). Як видно з рисунків, при даних формах стінок свердловини, створюються локальні зони стиснення, за рахунок чого до двох разів підвищуються напруження на контурах циліндрів в першому випадку і зменшуються величини напружень на контурі свердловини – у другому. Зіставлення розподілів напружень (рис. 4) дозволило виявити явні переваги і недоліки двох технологій, оскільки підвищені концентрації напружень при нарізці циліндрів і більш рівномірне поле напружень у другому випадку дають можливості різного впливу на породу і, відповідно, на процес її руйнування.

Таким чином встановлено, що стан стінок і порід приконтурної частини свердловин пов'язаний з рівнем напружень, які залежать від конфігурації конструкції забою, властивостей середовища і величини тиску в свердловині. Під дією напружень порода деформується, спочатку пружно, при досягненні дотичних напружень певної величини – непружно з незворотною зміною структури. Зміни структури порід тягнуть за

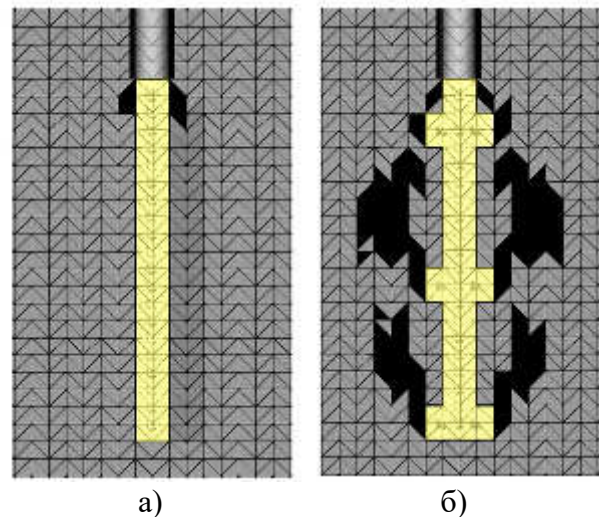


Рисунок 2 – Зони непружних деформацій в міцних тріщинуватих пісковиках навколо робочої частини свердловини без порожнин (а) і з трьома порожнинами (б), глибина 3000 м

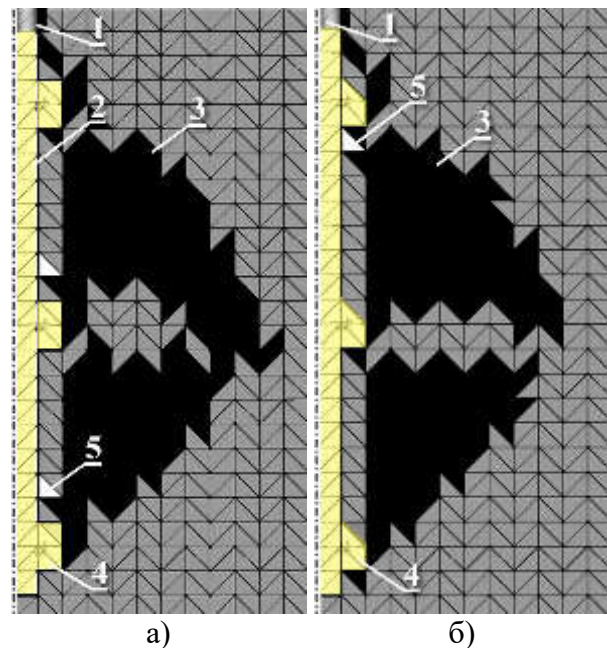


Рисунок 3 – Вплив форми порожнин в робочій зоні газовидобувних свердловин на розвиток зон підвищеної тріщинуватості (непружних деформацій): а – циліндричні форми порожнин; б – усічені форми порожнин; 1 - обсадна труба; 2 – активна частина свердловини; 3 – зони розвитку тріщинуватості; 4 – порожнини; 5 – розривні порушення масиву гірських порід

собою зміну фільтраційних властивостей породи і, головне, підвищують ефективність роботи свердловини.

ІГТМ НАНУ має великий досвід використання корисних властивостей від зміни конфігурації стінок шпурів та їх використання в підземних гірничих технологіях [17, 18]. Вони широко апробовані в шахтах, а оскільки шпур і свердловина є штучними циліндричними виробками в гірській породі, які відрізняються тільки діаметром і довжиною, то це дає підстави затверджувати, що апробовані технології створення в породному масиві навколо свердловин, наприклад, циліндричних і гвинтових типів порожнин, з незначними коректуваннями можуть бути використані для умов газових свердловин (рис. 5, а, г).

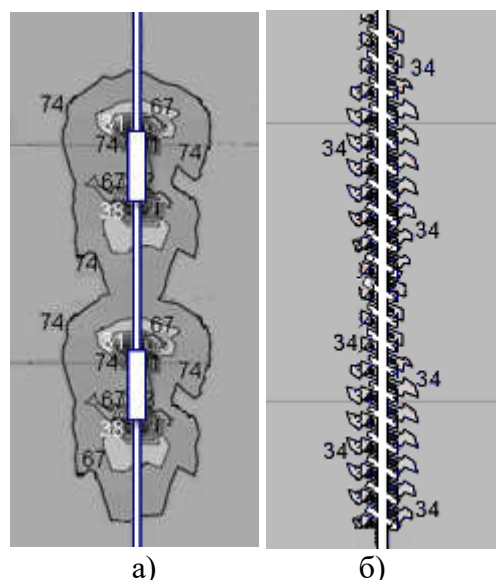


Рисунок 4 – Розподіл головних стискаючих напружень навколо свердловини (величини значень напружень представлені в МПа): а – з двома виступами; б – з гвинтовим пазом

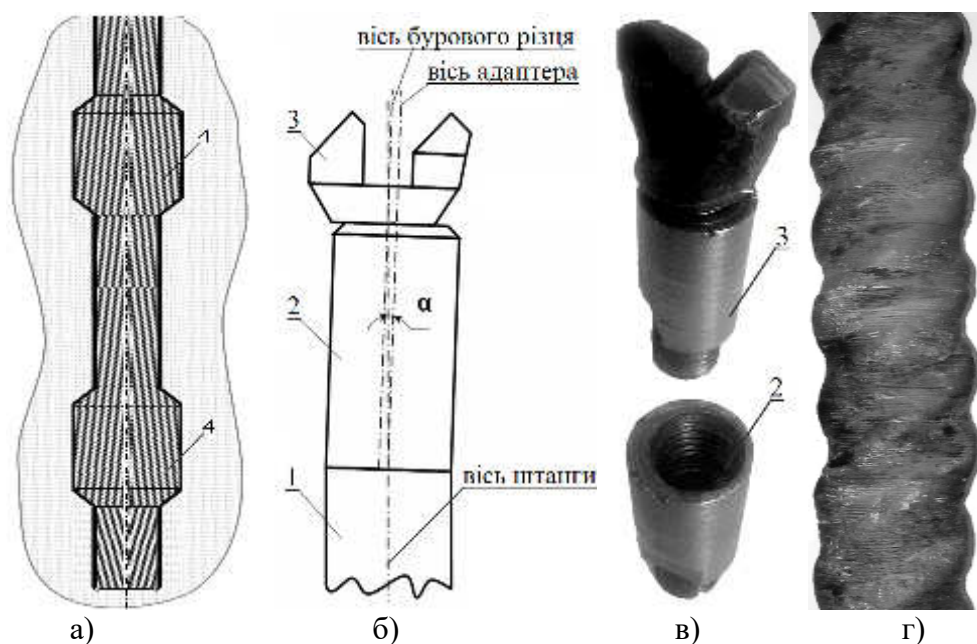


Рисунок 5 – Елементи технології та інструмент для зміни форми стінок шпурів: а – створення циліндричних порожнин; б – схема пристрою для нарізки гвинтових порожнин; в – пристрій для буріння стінок свердловини за формою крученої спіралі; г – конфігурація профілю стінок шпурів, яка виконана різцем РПА-181 (за результатами шахтних досліджень); 1 – бурова штанга, 2 – адаптер з ексцентриситетом; 3 – різець; 4 – циліндричні порожнини

Сутність першого способу полягає в тому, що в стандартний технологічний процес буріння вводиться додаткова фінішна операція – розсвердлювання на заданій глибині декількох порожнин (рис. 5, а), форма, розміри, кількість і розташування яких по довжині шпуру визначаються з урахуванням напружено-деформованого стану породи. Процес розсвердлювання порожнин здійснюється при витягуванні бурових штанг з зупинками в зазначених місцях і збереженні

максимальних обертів інструменту. Час розсвердлювання регламентується в залежності від міцності і стану порід, а також необхідного діаметру порожнин.

Сутність другого способу полягає в створенні на стінках оголення гвинтового паза безпосередньо в процесі буріння, що підвищує швидкість процесу розбурювання порожнин в гірських породах. Розроблено спосіб і пристрій для його реалізації. Такий складний рельєф являє собою кручену спіраль з кроком 40-50 мм (рис. 5, г). Для гарантованого ефекту розсвердлювання порожнин різець кріпиться до бурової штанги через адаптер з ексцентриситетом. Зсув осі різця щодо осі бурової штанги становить 1-2 мм (рис. 5, б). Бурові пристрої для профілювання захищені патентами [19, 20]. Необхідна глибина гвинтового паза задається величиною ексцентриситету і кутом розвороту адаптера, а крок гвинтової лінії – довжиною і діаметром бурової штанги, а також швидкістю обертання і подачі бурового інструменту.

На рисунку 6, а, зображено новий засіб, який пропонується для буріння стінок свердловин за конфігураціями порожнин, що представлені на рис. 6, б-ж. При розсвердлюванні на заданій глибині порожнини за трос підіймають кулю, яка регулює нахил різців для буріння конусоподібної порожнини. Куля визначає розкриття різців з напайками, відповідно, більше розкриття різців збільшує діаметр порожнини (рис. 6, б, в, е, ж), а менше розкриття – зменшує діаметр порожнини (рис. 6 г, д). Різні форми порожнин відробляють шляхом регулювання співвідношень:

- поступальної швидкості руху вниз бурового інструменту з одночасним розширенням різців (верхня конусоподібна частина порожнин на рис. 6, б-ж);
- поступальної швидкості руху вниз бурового інструменту і фіксацією кута нахилу різців (циліндрична частина порожнин на рис. 6, г, д, – менший кут нахилу різців; на рис. 6, е, ж, – більший кут нахилу різців);
- поступальної швидкості руху вниз бурового інструменту і зменшення кута нахилу різців (низ порожнин на рис. 6, г, б, в, ж);
- поступальним рухом вгору бурового інструменту з одночасним зменшенням кута нахилу різців (низ порожнин на рис. 6, д, е).

Продуктивність видобутку газу на родовищі складається з об'ємних витрат окремих свердловин довільної форми. При розрахунках об'ємної витрати газу для кільцевих контурів живлення в області розвантаження свердловини може бути використана відома інтегральна форма закону Дарсі для випадку плоскорадіального усталеного потоку газу (співвідношення Ж. Дюпюї):

$$Q = \frac{2\pi h k (p_2^2 - p_1^2)}{\mu p_a \ln \frac{R}{r}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (5)$$

де h – товщина проникного шару, м; k – коефіцієнт проникності порово-тріщинного простору, м^2 ; μ – динамічна в'язкість газу, що фільтрується, Па·с; p_1 , p_2 – забійний тиск на прямолінійній галереї стоку і на контурі живлення інтервалу, відповідно, Па; p_a – атмосферний тиск, Па; r – радіус області стоку, R – радіус кругового контуру дренажу, м.

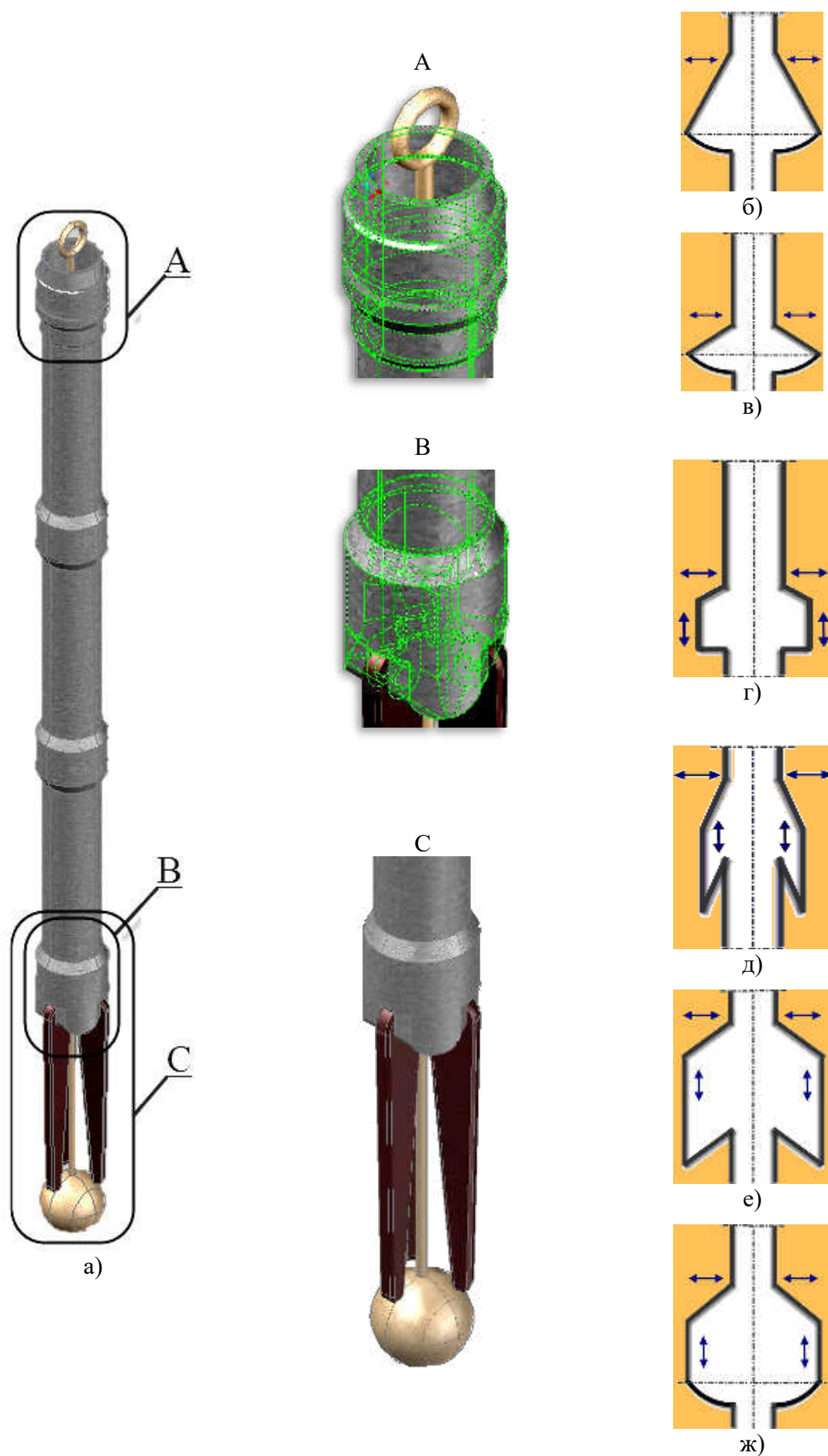


Рисунок 6 – Буровий засіб (а) і способи розбурювання стінок свердловин (б-ж), які пропонуються для створення порожнин різних форм в робочій частини свердловин

Модель фільтраційного переносу газів через тріщинуватий масив з урахуванням напружено-деформованого стану гірських порід на основі базового співвідношення Ж. Дюпюї (5) для довільного розташування систем тріщин отримана в роботі [21]

$$Q = \frac{(m + m_T b^2) (\sin^2 \varpi \cos^2 \theta + \cos^2 \varpi) \pi h \left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{p_a} \right)}{12 \mu \ln(R/r)}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6)$$

де m – природна пористість, відн. од.; m_T – тріщинна пористість, відн. од.; b – розкриття системи тріщин, м; ϖ – кут падіння системи тріщин, град.; θ – кут між заданим напрямом фільтрації і простяганням даної системи тріщин, град.

Як видно з співвідношень (5) і (6) об'ємні витрати фільтраційного переносу газів в породному масиві навколо робочої зони свердловини довільної конфігурації залежать від напружено-деформованого стану і ступеня руйнування гірських порід. Ці параметри, що характеризують процес непружного деформування гірських порід, визначають градієнти тисків навколо свердловини і проникність порово-тріщинного простору, які є найважливішими характеристиками газодинамічного процесу. Параметри проникності в найбільшій мірі залежать від орієнтації в геопросторі шляхів фільтрації газів, тріщинної пористості, розкритості пір і тріщин. У свою чергу зміни градієнтів тисків та об'ємів зон непружних деформацій в породному масиві навколо свердловини залежать від умов закладення і форми робочої області свердловини.

Приріст об'ємів тріщинного простору обчислюється за сумарною площею непружних елементів геомеханічної моделі і за середнім коефіцієнтом тріщиної пористості для породного масиву навколо досліджуваної робочої зони свердловини. Як показано на рис. 1 – рис. 3, ці параметри можуть бути досить надійно визначені процедурами методу скінченних елементів в результаті оцінки напружено-деформованого стану породного масиву сучасними інформаційними системами, наприклад, програмним комплексом GEO-RS[©] (розроблений в ІГТМ НАН України [6, 7]). При цьому сумарні площі непружних елементів геомеханічної моделі запропоновано розраховувати для серії перетинів (рис. 7).

Розглянемо свердловину з робочою зоною довільної конфігурації, навколо якої в газонасиченому породному масиві активізується зростання тріщин і утворюється зона непружних деформацій (рис. 7). Об'єм зони непружних деформацій навколо свердловини (рис. 7, а) складається з суми об'ємів непружних елементів моделі в інтервалах між горизонтальними перетинами. Передбачуваний об'єм зони фільтрації газу довільної форми в області впливу свердловини з різними конфігураціями робочої зони може бути представлений у вигляді добутку сум площ зруйнованих елементів геомеханічної моделі і середніх значень ширини проникних секторів (наприклад, сектора ABCD, рис. 7, б) на шляху транзиту газу в свердловину:

$$V_g = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k 2(\bar{R}_{ij} - \bar{r}_{ij}) h_i \frac{\delta_j (\bar{R}_{ij} + \bar{r}_{ij})}{2} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (\bar{R}_{ij}^2 - \bar{r}_{ij}^2) h_i \delta_j, \text{ м}^3, \quad (7)$$

де \bar{R}_i, \bar{r}_i – середні радіуси секторів зони дренажування і стоку, відповідно, м; $n = L_g/h$ – число інтервалів між горизонтальними перетинами; L_g – досліджувана

висота зони дренування, м; h – висота інтервалу розбивки, м; $k = 2\pi/\delta$ – число секторів розбивки кругової зони дренування; δ – кут розбивки сектора зони фільтрації, рад.

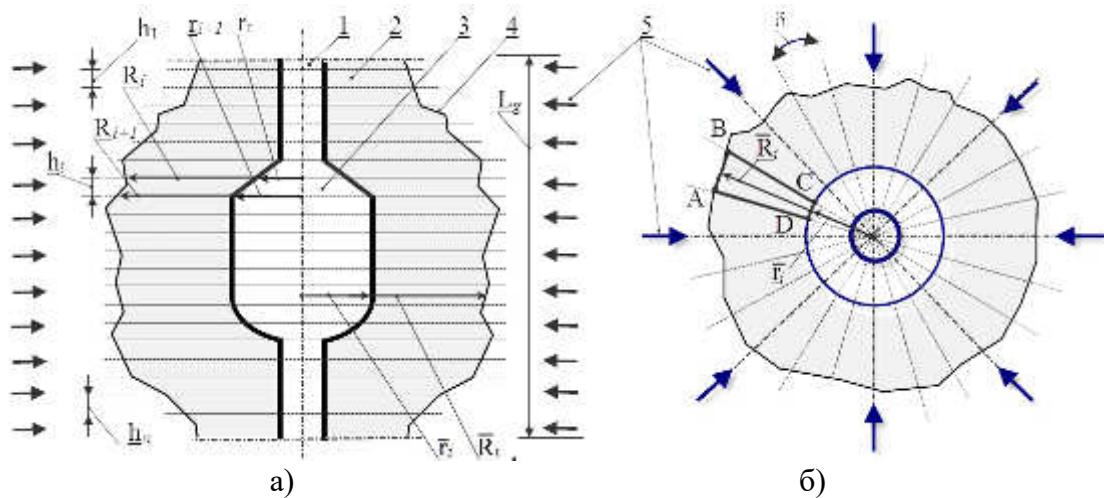


Рисунок 7 – Схема до розрахунку методом скінченних елементів можливої продуктивності робочої зони свердловин довільної конфігурації: а – вертикальний розріз свердловини довільної конфігурації; б – зона фільтрації навколо свердловини; 1 – свердловина; 2 – зона непружних деформацій; 3 – робоча частина свердловини; 4 – межа області підвищеної тріщинуватості; 5 – напрямки надходження газу в свердловину з продуктивного пласта

Взаємозв'язки між встановленими геомеханічними параметрами руйнування гірських порід (поширеністю зон непружних деформацій, об'ємами і розкриттям систем тріщин) навколо свердловини і можливими об'ємними витратами газів, як основного параметра, що характеризує ефективність газових свердловин довільної форми (у тому числі при застосуванні порожнин різних конфігурацій, см. рис. 3 – рис. 6), запропоновано визначати на основі оцінки об'ємів зруйнованих елементів геомеханічної моделі методом скінченних елементів з урахуванням параметрів відкритої пористості і тріщинуватості:

$$Q = \sum_{i=1}^{L_g/h} \frac{(m_i + m_T b^2) (\sin^2 \varpi \cos^2 \theta + \cos^2 \varpi) \pi h_i \left(\frac{p_2^2 - p_1^2}{p_a} \right)}{12\mu \ln \sum_{j=1}^{2\pi/\delta} \frac{\bar{R}_i}{\bar{r}_i}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (8)$$

В формулі (8) зміна тріщинної пористості відповідає змінам відносних об'ємів порово-тріщинного простору в газонесних породах після буріння свердловини і визначається за приростом кульової частини тензора деформацій зі співвідношення (4) в об'ємі досліджуваного елемента породного масиву [22]. Тензор деформації описується сумою векторів вузлових переміщень моделі (1). Продуктивність газового родовища розраховується за відомими методиками і посібниками з урахуванням зон руйнування порід навколо свердловин.

Наведена базова геофільтраційна модель враховує напружено-деформований стан породного масиву та використовується при визначенні фільтраційних характеристик транзиту вільного газу в свердловину і, в разі необхідності, може бути доповнена співвідношеннями і коефіцієнтами, що враховують газодинамічну недосконалість свердловин, відсутність радіальності потоків, конструкції заборів або фільтрів і ін.

Таким чином, отримані наступні наукові результати:

- подальший розвиток отримала геофільтраційна модель транзиту вільних газів в експлуатаційні свердловини, яка відрізняється урахуванням закономірностей зміни напружено-деформованого стану та об'ємів порово-тріщинного простору довільної форми навколо робочої зони свердловин з різними конфігураціями робочої зони;
- вперше запропоновано співвідношення для оцінки передбачуваних об'ємних витрат газу, що надходить у свердловину, на базі оцінки методом скінченних елементів приросту кульової частини тензора деформацій і об'ємів зруйнованих елементів геомеханічної моделі. Встановлено взаємозв'язки між визначеними геомеханічними параметрами руйнування гірських порід (градієнтами тисків, поширеністю зон непружних деформацій, тріщинною пористістю і розкриттям систем тріщин) навколо робочої зони свердловин довільної конфігурації і продуктивністю газової свердловини;
- встановлено, що зміною форми робочої частини газової свердловини можна управляти напружено-деформованим станом навколишніх порід, підвищувати їх тріщинуватість і активізувати дебіт газу. При цьому необхідні попередні розрахунки напружено-деформованого стану порід конкретного родовища для обґрунтування раціональних форм порожнин та передбачуваних витрат газу;
- математичне моделювання гірських порід навколо свердловини без профілювання її поверхні та при різних способах створення порожнин дозволило встановити, що вибір раціональної форми робочої зони свердловин дозволяє, по-перше, інтенсифікувати процес розтріскування порід (збільшення більше 20 %), що істотно підвищує їх проникність і дебіт, по-друге, змістити зону концентрації напружень від стінок свердловини вглиб породного масиву, що підвищує їх стійкість. Для зміни конфігурації стінок свердловин запропоновані апробовані в шахтах технології створення в породному масиві навколо свердловин циліндричних і гвинтових типів порожнин. Виявлені переваги та недоліки цих технологій;
- методом інженерного конструювання тривимірних об'єктів розроблено новий засіб для профілювання і створення поверхні робочої частини свердловин довільної конфігурації, запропоновані способи його використання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Энергетика: история, настоящее и будущее. От огня и воды к электричеству: в 5 т. / науч. ред. И.Н. Карп [и др.]. К., 2005. Том 1. 304 с.
- 2 Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. Метод георыхления - новый подход к проблеме повышения продуктивности скважин / Технологии ТЭК. 2003. № 1. С. 31-35.
- 3 Христианович С.А., Карев В.И. К расчету установившегося течения в скважине при наличии выделения газа из нефти (газлифта). В кн. Христианович С.А. Избранные работы. М.: Изд-во Наука – Изд-во МФТИ, 1998. С. 207-216.
- 4 Увеличение продуктивности нефтяных скважин с помощью метода георыхления / Христианович С.А. и др. Нефть и газ Евразия. 2000. № 2. С. 90-94.
- 5 Булат А.Ф., Слащев И.Н. Особенности и практика использования методов математического моделирования для оценки геомеханических и газодинамических процессов / Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2012): Матер. XI Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием, Анжиро-Судженск, 23-24 нояб. 2012 г. Кемерово: Практика, 2012. Ч. 1. С. 22-26.
- 6 Булат А.Ф., Слащев И.Н. Разработка компьютерных систем математического моделирования геомеханических процессов / Геотехническая механика. Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2012. № 99. С. 16-27.
7. Слащев И.Н. Применение информационных технологий для повышения эффективности и безопасности горных работ /

- Уголь Украины. 2013. № 2. С. 40-43.
- 8 Галагер Р. Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 428 с.
 - 9 Zienkiewicz, O.C., Taylor, R. L., Zhu J. Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Butterworth-Heinemann.
 - 10 Слащев И.Н. Разработка математической модели и технологии компьютерного анализа тектонически нарушенного структурно-неоднородного породного массива / Геотехническая механика. Днепр: ИГТМ НАНУ, 2012. № 104. С. 94-109.
 - 11 Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. М.: Недра, 1984. 415 с.
 - 12 Усаченко, Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок. Киев: Наук. думка, 1979. 136 с.
 - 13 Усаченко Б.М., Кириченко В.Я., Шмиголь А.В. Охрана подготовительных выработок глубоких горизонтов шахт Западного Донбасса. М.: ЦНИИУголь, 1992. 168 с.
 - 14 Турчанинов И.А., Иосиф М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. Л.: Недра, 1989. 488 с.
 - 15 Справочник по разработке крутых и крутонаклонных угольных пластов Донбасса / под общ. ред. Гребенкина С.С., Иванова И.Ф. Донецк: РВА ДонНТУ, 2003. 320 с.
 - 16 Кирничанский Г.Т. Исследование и разработка методов определения свойств горных пород и математического моделирования как основа прогнозирования устойчивости выработок: дис... канд. техн. наук / Спец. 01.02.07. Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 1979. 204 с.
 - 17 Практический опыт повышения эффективности угледобычи и безопасности труда в сложных горно-геологических условиях / Слащев И.Н. и др. Научный вестник НГУ. Днепропетровск: РИК НГУ, 2009. № 11. С. 20-25.
 - 18 Промышленные испытания новых способов и средств повышения несущей способности анкерных систем в неустойчивых породах / Слащев И.Н. и др. Сб. науч. трудов НГУ. Днепропетровск: РИК НГУ, 2010. № 35. Том 1. С. 111-120.
 - 19 Буровий постав для нарізки шпура: пат. № 49822 UA / О.А. Цікра та ін. № 12377; заявл. 30.09.2009; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.
 - 20 Спосіб закріплення анкера у породах гірничої виробки: пат. № 58761 UA / О.А. Цікра та ін. № 11401; заявл. 24.09.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.
 - 21 Булат А.Ф., Слащев И.Н., Слащева Е.А. Комплексирование методов оценки геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве для систем контроля производственной среды шахт / Геотехническая механика. Днепр: ИГТМ НАНУ, 2017. № 134. С. 3-21.
 - 22 Слащев И.Н. Особенности геомеханического и радиометрического контроля безопасности производственной среды шахт. *Sciences of Europe*. 2019. 37(1). 47-53.

REFERENCES

- 1 Carp, I.N. [et al.] (ed.) (2005) *Energy: history, present and future. From fire and water to electricity*, Vol. 1, Kiev, UA.
- 2 Kovalenko, Yu.F. and Karev, V.I. (2003) Metod georykhleniya – novyy podkhod k probleme povysheniya produktivnosti skvazhin, *Tekhnologii TEK*, 1, 31-35.
- 3 Khristianovich, S.A. and Karev, V.I. (1998) K raschetu ustanovivshegosya techeniya v skvazhine pri nalichii vydeleniya gaza iz nefti (gazlifta), In the book: Khristianovich S.A. *Selected works*, Nauka, Moscow, pp. 207-216.
- 4 Khristianovich, S.A. et al. (2000) Increasing the productivity of oil wells using of geo-loosening method, *Oil and gas Eurasia*, 2, 90-94.
- 5 Bulat, A.F. and Slashchov, I.M. (2012) Features and practice of using methods of mathematical modeling for the evaluation of geomechanical and gas-dynamic processes, *11th International Scientific Conference "Information Technologies and Mathematical Modelling"*, Anzhero-Sudzhensk, Russia, 20-22 November 2012, vol. 1, pp. 22-26.
- 6 Bulat, A.F. and Slashchov, I.M. (2012) Development of computer systems mathematical modeling geomechanical processes, *Geotekh. mekh.*, 99, 16-27.
- 7 Slashchov, I.M. (2013) The use of information technology to increase the efficiency and safety of mining operations, *Coal of Ukraine*, 2, 40-43.
- 8 Gallager, R. (1984) *Finite Element Analysis. Fundamentals*, Nauka, Moscow.
- 9 Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. and Zhu J.Z. (2005) *Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, Butterworth-Heinemann.
- 10 Slashchov, I.M. (2012) The development of mathematical model and technology of computer analysis of tectonically disturbed structurally-heterogeneous rock massif, *Geotekh. mekh.*, 104, 94-109.
- 11 Baklashov, I. V. and B.A. Kartoziya (1984), *Mekhanika podzemnykh sooruzheniy i konstruksiy krepey*, Nedra, Moscow.
- 12 Usachenko, B.M. (1979) *Svoystva porod i ustoychivost gornykh vyrabotok* [Rock properties and stability of mine workings], Nauk. dumka, Kiev, UA.
- 13 Usachenko, B.M., Kirichenko, V.YA. and Shmigol, A.V. (1992), *Okhrana podgotovitelnykh vyrabotok glubokikh gorizontov shakht Zapadnogo Donbassa*, TSNIIEugol, Moscow.
- 14 Turchaninov, I.A., Iosif, E.V. and Kasparyan, M.A. (1989) *Fundamentals of rock mechanics*, Nedra, Leningrad.
- 15 Grebenkin, S.S. and Ivanov I.F. (ed.) (2005) *Spravochnik po razrabotke krutykh i krutonaclonnykh ugolnykh plastov Donbassa* [Handbook for the development of steep and steeply coal seams of Donbass], Donetsk, UA.
- 16 Kirnichanskiy, G.T. (1979) Issledovaniye i razrabotka metodov opredeleniya svoystv gornykh porod i matematicheskogo modelirovaniya kak osnov prognozirovaniya ustoychivosti vyrabotok, Ph.D. dissertation, Mechanics of Granular Bodies Grounds and Rocks, IGTM NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, UA.
- 17 Slashchev, I.N., Kurnosov, S.A., Slashcheva, E.A., Filimonov, P.Ye. and Tsikra, A.A. (2009) Prakticheskiy opyt povysheniya effektivnosti ugledobychi i bezopasnosti truda v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh, *Scientific Bulletin of National Mining University*, 11, 20-25.

- 18 Slashchev, I.N., Kurnosov, S.A., Ikonnikova, N.A., Filimonov, P.Ye. and Tsikra, A.A. (2010) Industrial testing of new ways and means of increasing the carrying capacity of anchor systems in unstable rocks, *Collection of research papers of the National Mining University*, 5, Vol. 1, 111-120.
- 19 Tsikra, O. et al., IGTM NAS of Ukraine (2010) *Burovyi postav dlya narizky shpura*, State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 49822.
- 20 Tsikra, O. et al., IGTM NAS of Ukraine (2011) *Sposib zakriplennya ankera u porodakh hirnychoi vyrobky*, State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 58761.
- 21 Bulat, A.F., Slashchov, I.M. and Slashchova O.A. (2017) Evaluation methods of interconnected geomechanical and gas dynamic processes in the rock massif for the systems of working medium control in the mines, *Geotekh. mek.*, 134, 3-21.
- 22 Slashchov, I.M. (2019) Features of geomechanical and radiometric safety control of working medium in the mines, *Sciences of Europe*, 37(1), 47-53.

Про авторів

Буллат Анатолій Федорович, Академік Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, директор інституту, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), Дніпро, Україна, gtm.bulat@gmail.com

Слащов Ігор Миколайович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу Проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), Дніпро, Україна, IMSlashchov@nas.gov.ua

Слащова Олена Анатоліївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник у відділі Проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, OASlashchova@nas.gov.ua

Макеєв Сергій Юрійович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник у відділі Проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, smakeev@ukr.net

Рижов Геннадій Олександрович, молодший науковий співробітник у відділі Проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, smakeev@ukr.net

About the authors

Bulat Anatolii Fedorovich, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Director of the Institute, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, gtm.bulat@gmail.com

Slashchov Ihor Mykolaiovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, IMSlashchov@nas.gov.ua

Slashchova Olena Anatoliyivna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, OASlashchova@nas.gov.ua

Makeiev Serhii Yuriiovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, smakeev@ukr.net

Ryzhov Hennadii Oleksandrovych, Junior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, smakeev@ukr.net

Аннотация. Фильтрация газа в породном массиве определяется наличием в них связанных пор, микротрещин и трещин, поэтому решающую роль играют действующие в породе напряжения, изменения которых могут приводить как к увеличению проницаемости, так и к её уменьшению. Кроме того, может происходить явление компакций - механического проседания пласта в результате уменьшения пластового давления, которое перекрывает дебиты скважин и требует неотложных мер по повышению проницаемости породного массива. Снижение дебитов скважин сопровождается большими затратами средств. Поэтому управление напряженно-деформированным состоянием породного массива и процессом трещинообразования вокруг рабочей части скважин путём обоснования формы поверхности скважины является актуальной научной задачей. Цель работы: повышение эффективности месторождений газа за счёт обоснования конструктивных параметров рабочей зоны эксплуатационных скважин. Методы исследований: систематизация научных публикаций и экспериментальных данных, математическое моделирование методом конечных элементов и начальных напряжений, методы инженерного конструирования трёхмерных объектов.

Дальнейшее развитие получила геофильтрационная модель транзита свободных газов в эксплуатационные скважины, которая отличается учётом закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния и объёмов порово-трещинного пространства вокруг рабочей зоны скважин произвольной конфигурации. Впервые предложено соотношение для оценки предполагаемых объёмных расходов поступающего в скважину газа на базе оценки методом конечных элементов прироста шаровой части тензора деформаций и объёмов разрушенных

элементов геомеханической модели. Определены взаимосвязи между установленными геомеханическими параметрами разрушения горных пород (градиентами давлений, распространённостью зон неупругих деформаций, трещинной пористостью и раскрытостью систем трещин) вокруг рабочей зоны скважин произвольной конфигурации и производительностью газовой скважины.

Проведено математическое моделирование рабочей зоны скважины без профилирования её поверхности и при разных способах профилирования. Установлено, что выбор рациональной конфигурации рабочей зоны скважин позволяет, во-первых, интенсифицировать процесс растрескивания пород, что существенно повышает их проницаемость и дебит, во-вторых, сместить зону повышенных напряжений от стенок скважины вглубь породного массива, что повышает их устойчивость. Сопоставление распределений напряжений позволило выявить преимущества и недостатки этих технологий, поскольку повышенные концентрации напряжений при нарезке цилиндров и более равномерное поле напряжений в случае винтовой резьбы дают возможности различного воздействия на породу и соответственно влияют на процессы её разрушения. Показано, что изменением формы рабочей части газовой скважины можно управлять напряженно-деформированным состоянием окружающих пород, повышать трещиноватость пород и активизировать дебит газа. Разработаны новые устройства для профилирования и создания поверхности рабочей части скважин произвольной конфигурации.

Ключевые слова: газовое месторождение, призабойная зона скважин, моделирование напряженно-деформированного состояния пород, геофильтрационные методы, способы активизации дебита скважин

Abstract. Gas migration in the rock massif is explained by the presence of interconnected pores, microcracks and cracks; therefore, rock stresses always play a decisive role as their changes can increase or reduce the rock permeability. Besides, such phenomenon as compaction, i.e. mechanical subsidence of the formation as a result of decreased rock pressure, may occur, which stops the bore-hole flow rates requiring urgent measures for increasing permeability of the rock massif. The bore-hole flow rate decrease is accompanied by great expenditures. Therefore, control of the rock massif stress-strain state and process of crack formation around the working area of the bore-holes with the help of the justified shape of the bore-hole surface is a pressing scientific task. Purpose of the research: to increase the gas fields efficiency by justifying design parameters for the working area of the production bore-hole. Research methods: systematization of scientific publications and experimental data, mathematical modeling by finite element method and initial stresses method, methods of engineering design of three-dimensional objects.

The geofiltration model of free gas transit into production bore-holes was further developed, which now differs by considering patterns of changes in the stress-strain state and volumes of the porous fractured space around of the bore-hole working area of arbitrary configuration. It is for the first time, when ratio is proposed for estimating supposed volumetric flow rates of gas entering the bore-hole on the base of finite element method used for evaluating increment of the ball part of the strain tensor and volumes of the destroyed elements in the geomechanical model. Interrelations between the established geomechanical parameters of the rocks destruction (i.e. pressure gradients, extent of inelastic deformation zones, fracture porosity and opening of fracture systems) around the bore-hole working area of arbitrary configuration and productivity of the gas bore-hole were determined.

With the help of different profiling methods, mathematical model of the bore-hole working area was created without profiling its surface. It is established that the choice of a rational configuration for the bore-hole working area allows, firstly, to intensify process of the rocks cracking, which significantly increases their permeability and flow rate, and secondly, to shift zone with increased stresses from the bore-hole walls deep into the rock mass and to increase their stability. Comparison of stresses distributions made it possible to identify advantages and disadvantages of these technologies, since high concentrations of stresses during cylinder cutting and more uniform field of stresses in case of a screw thread can differently effect the rocks and, accordingly, differently impact on the processes of their destruction. It is shown that, by changing shape of the gas bore-hole working area, it is possible to control stress-strain state of the surrounding rocks, increase the rocks fracturing and activate the gas flow. New devices for profiling and forming surface of the bore-hole working areas of arbitrary configuration were designed.

Keywords: gas field, bore-hole working area, modeling of the rock stress-strain state, geofiltration methods, methods for activating the bore-hole flow rate

Статья поступила в редакцию 13.02.2019

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, проф. В.И. Дырдой