

# ASSESSMENT OF THE STRESS STATE AND THE DEGREE OF UNLOADING OF THE COAL LAYER BY HYDRAULIC INJECTION INDICATORS

*S.Mineev<sup>1</sup> & O.Usov<sup>1\*</sup> & Yu.Polyakov<sup>1</sup> & A.Kostritsa<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named M.S. Polyakov the National Academy of Science of Ukraine, Dnipro, Ukraine*

*\* Corresponding author: [Usov.o.a@gmail.com](mailto:Usov.o.a@gmail.com)*

**Abstract.** The relationship between the stress state of the coal seam and the shape of the barodynamic injection diagram is described. It is established that the extreme barodynamics corresponds to the extreme stress state of the formation. The asymptotic shape of the barodynamic curve indicates that the formation is not in an extremely tense state. A sharp drop in pressure at the final stage of hydrotreatment with asymptotic barodynamics indicates a secondary fracturing.

**Keywords:** ultimate stress state, mechanical deformations, rock pressure, hydraulic pressure, barodynamics, indicator diagram, fracturing, hydraulic extraction

## ОЦІНКА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТА СТУПЕНЮ РОЗВАНТАЖЕННЯ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА ЗА ГІДРАВЛІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ НАГНІТАННЯ

*С.Мінеєв<sup>1</sup> & О.Усов<sup>1\*</sup> & Ю.Поляков<sup>1</sup>, & А.Костриця<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна*

*\*Відповідальний автор: [Usov.o.a@gmail.com](mailto:Usov.o.a@gmail.com)*

**Анотація.** Викладений взаємозв'язок напруженого стану вугільного пласта з формою бародинамічної діаграми нагнітання. Встановлено, що екстремальна бародинаміка відповідає граничному напруженому стану пласта. Асимптотична форма бародинамічної кривої свідчить про те, що пласт не знаходиться в гранично напруженому стані. Різкий спад тиску на кінцевій стадії гідрообробки з асимптотичною бародинамікою свідчить про вторинний гідророзрив пласта.

**Ключові слова:** граничний напружений стан, механічні деформації, гірничий тиск, гідравлічний тиск, бародинаміка, індикаторна діаграма, гідророзрив, гідровіджимання

### 1. Вступ

Одним з нормативних способів боротьби з газодинамічними явищами є заходи по нагнітання води у вугільний пласт під високим тиском [1]. Основний ефект гідрообробки викидонебезпечного вугільного пласта полягає в розвантаженні його привибійної частини від сил гірського тиску. Він виявляється сейсмоакустичними вимірами, вимірами зміщення покрівлі, а також порівнянням поінтервальних вимірів газовиділення в контрольні шпури до і після гідрообробки. Але існує ще одне джерело оперативної інформації про зміну гірського тиску – гідравлічні показники нагнітання – бародинамічна та індикаторна діаграми [1]. Гірський тиск впливає на проникність пласта, а зміна проникності впливає на перебіг гідравлічних параметрів плином процесу. Тож виявлення зв'язку гірського тиску з гідравлічними параметрами нагнітання, та розробка на цій основі критеріїв оперативної оцінки напруженого стану пласта є актуальною науковою задачею.

### 2. Методика

Узагальнення попередніх теоретичних та експериментальних результатів досліджень процесу гідрообробки вугільних пластів

### 3. Результати та обговорення

Виділяють два основні режими гідрообробки викидонебезпечних пластів - гідровіджимання і гідророзпушування [2]. Обидва ці режими з гідравлічних параметрів -

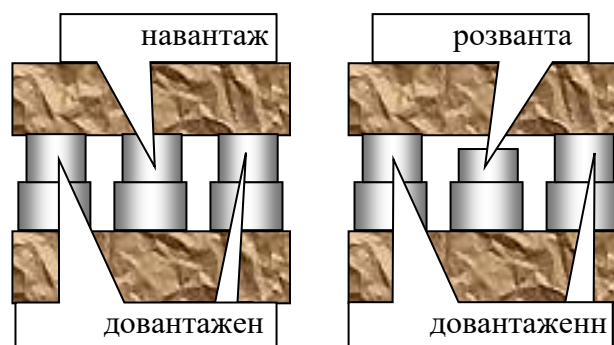
тиску і темпу нагнітання аналогічні. Різниця полягає в довжині фільтрувальної частини шпуру і глибині його герметизації. При гідровіджиманні шпур герметизують неглибоко (~ 2м) і залишають коротку (~ 0,2 м), що фільтрує частина. А при гідророзпушування шпур герметизують глибше (~ 5м), а його фільтруючу частину роблять набагато довше (~ 2м).

Зміна глибини герметизації і довжини фільтрувальної частини свердловини радикально змінюють результат гідрообробки. При гідророзпушування візуальні ознаки руйнування привибійної частини пласта відсутні, її розвантаження від гірського тиску визначається шляхом аналізу сейсмоакустики і поінтервальних вимірів газовиділення в контрольні шпури.

А при гідровіджиманні візуально спостерігається висування частини пласта, супроводжуване майже повним руйнуванням вугілля на глибину 0,5-1,0м. Ця ознака беззаперечно свідчить про **гідро силовий** механізм розвантаження пласта. Висування пласта обумовлено силовою дією рідини, що спочатку утворює гідро провідну тріщину, орієнтовану паралельно вибою, а потім через цю тріщину висуває вугілля у вибій. Якщо б довжина фільтруючої частини свердловини була більшою, то гідро провідна тріщина утворювалася б не паралельно вибою, а під кутом до нього ( ~70÷90°) і висування вугілля б не відбулося. Цьому випадку відповідає звичайний гідро розрив, який теж відноситься до **гідро силової** дії рідини на пласт, але не призводить до його розвантаження. Гідро віджимання ж, хоча і ефективно розвантажує пласт, але часто провокує раптовий викид.

Тому, зараз він не застосовується, а пласт обробляється в режимі гідро розпушення, при якому одночасно діють два ефекти розвантаження, які описані в [1] – знеміцнення вугілля, та збільшення його податливості.

Механізми цього розвантаження зрозумілі на прикладі перерозподілу гірського тиску при опусканні однієї секції гідравлічного кріплення (малюнок 1).

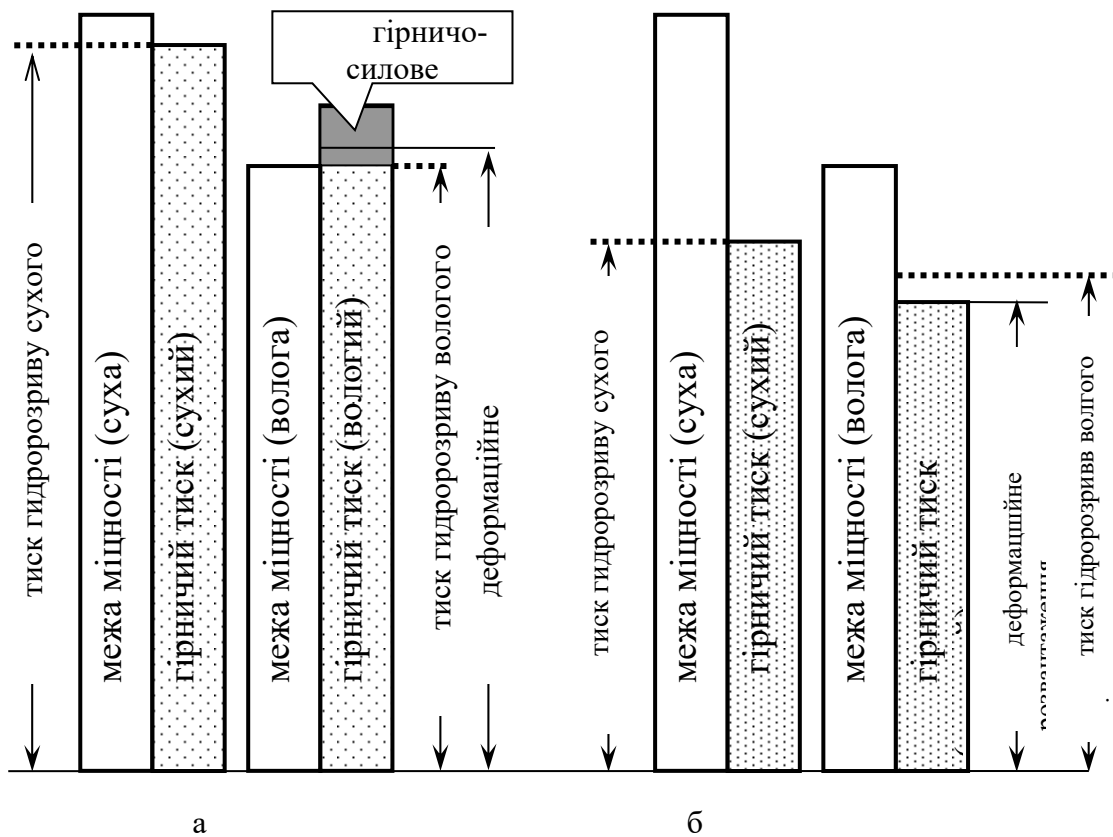


- а) сухий пласт - все секції навантажені однаково;
- б) волога середня частина пласта (секція) – розвантажена, сухі крайні частини пласта (секції) – довантажені

Малюнок 1 - Модель деформаційного розвантаження пласта

Перед нагнітанням всі три секції кріплення, кожна з яких моделює свою частину суцільного вугільного пласта, знаходяться в розпертому стані і несуть однакове навантаження з боку покрівлі. Збільшення податливості середньої, зволоженою частини вугілля еквівалентно опускання середньої секції кріплення. При опусканні середня секція розвантажується, а дві крайні секції (моделюють сухі частини пласта) - навантажувальний і сприймають (удвох) те навантаження, яке несли три секції до початку нагнітання.

Деформаційне розвантаження пласта має місце при будь-яких режимах нагнітання крім гідророзриву. Схема зміни стану пласта в результаті спільної дії ефектів розміцнення і збільшення податливості пласта показана на малюнку 2.



а) – гранично напружений пласт; б) – не гранично напружений пласт;

Малюнок 2 – Деформаційне розвантаження пласта

З початком нагнітання починаються два паралельні процеси - розміщення вугілля і збільшення його податливості. Процес розміщення глибший - міцність знижується  $\sim 20\%$ . А деформаційне розвантаження пласта за рахунок збільшення його піддатливості не таке велике,  $\sim 10\%$ .

Тому, якщо гiрничий тиск настільки великий, що пласт знаходиться в граничному напруженому стані (мал. 2-а), то його **гiрничо-деформаційне** розвантаження ( $\sim 10\%$ ) доповнюється **гiрничо-силовим** ( $\sim 20\%$ ). В результаті гранично напружений пласт розвантажується приблизно на  $20\%$  - поки гiрничий тиск не прийде в відповідність зниженому межі міцності вологого вугілля. Це розвантаження супроводжується тріщино утворенням, але не від гiдравлічного, а від гiрського тиску. Тому воно і зветься гiрничо-силовим на відміну від гiдро силового розвантаження при гiдро віджиманні. Гiрничо-силове тріщино утворення під дією гiрського тиску названо гiдро розпушуванням.

Якщо пласт не перебуває у граничному напруженому стані (мал. 2-б), то гiрничо-силове розвантаження не відбувається, а працює тільки деформаційне розвантаження за рахунок збільшення податливості вологого пласта ( $\sim 10\%$ ). В цьому випадку площа розвантаження по простяганню пласта обмежена зоною його насичення вологою. Тоді як ця площа у випадку граничного напруженого стану буде більшою – за рахунок гiрничо-силового тріщино утворення в сухому вугіллі із-за його довантаження на межі контуру зволоження (мал. 1).

Важливо також розуміти, що пласта, який до гiдро обробки знаходився в гранично напруженому стані, після неї також залишається в гранично напруженому стані. Навантаження на нього з боку покрівлі зменшиться тільки за рахунок переміщення зони максимуму опiрного тиску в глибину масиву. Бічної підтримки з боку не зволоженого пласта (як на мал. 1) майже не відбувається, бо ці ділянки теж розвантажуються внаслідок зростання на них гiрського тиску.

В протилежність цьому пласт який до гідро обробки не знаходився в гранично напруженому стані, після неї також залишається в не гранично напруженому стані. Навантаження на нього з боку покрівлі зменшиться не тільки за рахунок переміщення зони максимуму опірному тиску в глибину масиву а і за рахунок бічної підтримки не зволжених ділянок пласта, які хоча і дещо довантажуються, але не переходять в гранично напружений стан.

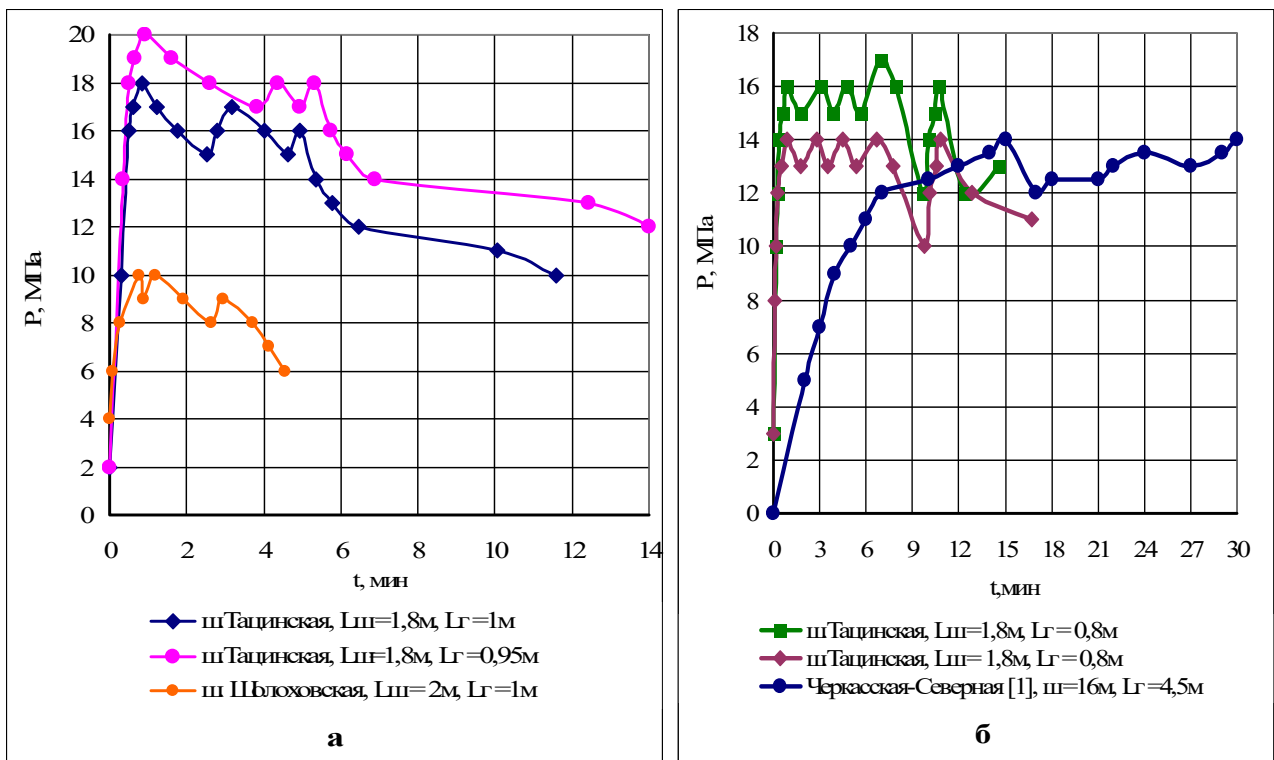
На мал. 2 пунктирними лініями показані значення тиску гідророзриву пласта на початку (сухий пласт) і в кінці (вологий пласт) нагнітання. Вони наочно показують, що тиск гідророзриву не залишається постійною величиною протягом процесу нагнітання. У початковій стадії, коли міцність і піддатливість вугілля не встигають помітно змінитися, тиск гідророзриву буде більше (первинний гідророзрив), а після 20 ÷ 40 хвилин нагнітання він зменшується на 10 ÷ 20% (вторинний гідророзрив).

З одного боку, вторинний гідророзрив, можливість якого нормативною базою не передбачена, може призвести до незавершеності процесу розвантаження пласта і зниження ефективності локального заходу. А з іншого боку, вторинний гідророзрив, спеціально проведений наприкінці нагнітання дозволяє на місці визначити ступінь розвантаження пласта і уникнути вимірів газовиділення після нагнітання. Це позбавляє персонал від необхідності бурити додатковий шпур для виміру газовиділення.

А оскільки вторинний гідророзрив визначається в процесі нагнітання за стандартними приладами, загальна трудомісткість заходи помітно знижується.

З огляду на вище сказане виникає питання – чи можна безпосередньо в процесі нагнітання визначити наскільки близький тиск нагнітання до гірського тиску на стінки свердловини?

Відповідь на це запитання має бути позитивною. Спостерігаючи за зміною тиску плинном часу нагнітання (мал. 3) – так звану бародинамічну кривою можна впевнено визначити ступінь відповідності тиску нагнітання гірничому тиску.



а) – екстремальна крива; б) – асимптотична крива.

Малюнок 3 – Зміна в часі тиску (бародинаміка) в коротких шпурах на шахтах во «Ростоввугіля».

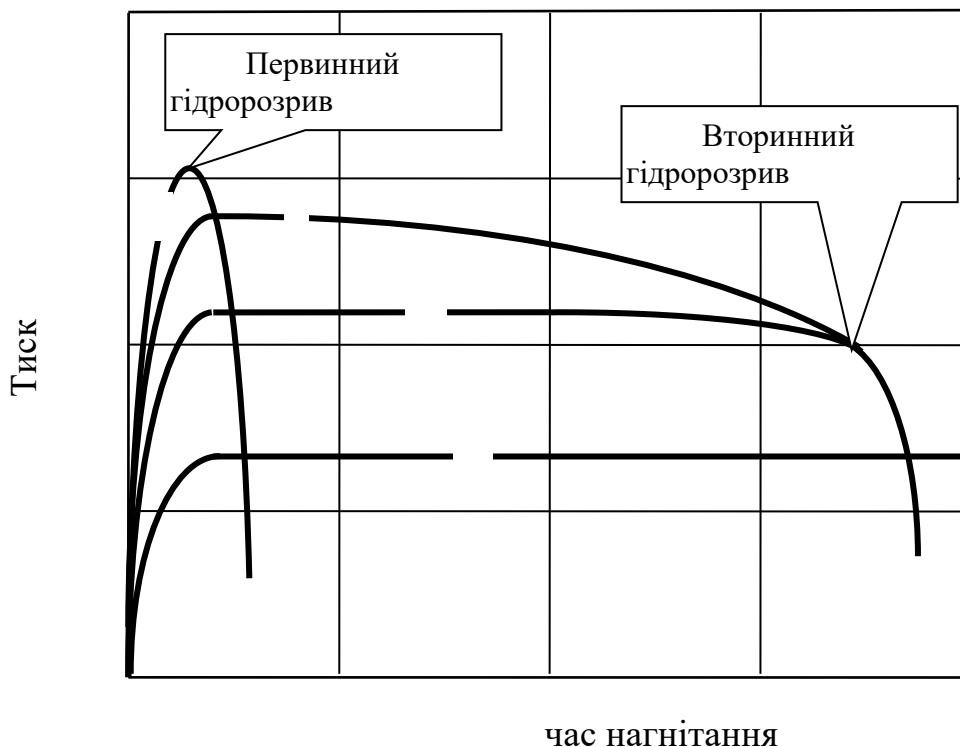
Як бачимо, існують дві форми бародинамічних кривих – екстремальна та асимптотична. При екстремальній бародинаміці (мал. 3-а) тиск, що піднявся за 1 – 2 хвилини до максимуму, в подальшому плавно знижується протягом десятків хвилин. На останній стадії падіння тиску збігається з появою витоків, що спостерігається на оголеній поверхні пласта. Тобто ця крива має чітко визначений екстремум, тому й зветься екстремальною.

Екстремальна бародинаміка свідчить про те, що початковий максимальний тиск нагнітання зіставлений з гірським тиском. В подальшому із-за гірничо-силового і деформаційного розвантаження гірський тиск плавно і поступово знижується і відповідно цьому знижується і тиск нагнітання.

В інших випадках (мал. 3-б) бародинамічні криві мають виражену ділянку стабілізації тиску після його початкового підйому протягом тих же 1 – 2 хвилин. Її тривалість теж може сягати десятків хвилин. В кінцевій стадії тиск нагнітання спостерігаються витокі із пласта. Про їх характер йдеться трохи пізніше. Ця крива не має чітко визначеної екстремальної точки, натомість вона має верхню межу, поблизу якої тиск знаходиться протягом всього нагнітання. Тому ця крива зветься асимптотичною.

Різниця між екстремальною та асимптотичною формами бародинамічних кривих обумовлена двома чинниками: характером напруженого стану контуру свердловини та тиском нагнітання.

Якщо контур свердловини знаходиться в гранично напруженому стані, то з початком нагнітання з будь яким тиском починається знеміцнення вугілля навколо контуру свердловини і його гірничо силове розвантаження. Внаслідок цього тріщинуватість вугілля на контурі свердловини потроху підвищується, а тиск нагнітання потроху зменшується. Тобто спостерігається асимптотична бародинаміка, яка зображена лінією 2 на малюнку 4.



Малюнок 4 – Схематичні бародинамічні криві при різному напруженому стані пласта: 1 – звичайний гідророзрив; 2 – екстремальна бародинаміка для гранично напруженого пласта; 3 – асимптотична бародинаміка вторинного гідророзриву не гранично напруженого пласта; 4 – асимптотична бародинаміка не гранично напруженого пласта без вторинного гідророзриву

Лінією 1 на мал. 4 позначена бародинамічна крива, яка спостерігається при звичайному (первинному) гідророзриві – коли тиск нагнітання помітно перевищує гірський тиск на сухий пласт  $P_{гс}$ .

Якщо контур свердловини не перебуває в гранично напруженому стані, то бародинаміка має асимптотичний характер позначений лініями 3,4. Зрозуміло, що асимптотичний характер бародинаміка має тільки при умові, що тиск нагнітання не сягає гірського тиску на сухий пласт  $P_{гс}$ , бо інакше і в цьому випадку настане гідророзрив з бародинамікою у формі лінії 1.

Лінія 3 відповідає випадку вторинного гідророзриву. Для його здійснювання потрібно, щоб тиск нагнітання був дещо вищий тиску гідророзриву зволоженого вугілля. Оскільки процес пласт, який не знаходиться в гранично напруженому стані, розвантажується за рахунок виключно деформаційного механізму, цей процес потребує досить тривалого часу на протязі якого тиск нагнітання залишається стабільним.

Тільки на кінцевій стадії, коли внаслідок насичення вугілля вологою, гірський тиск знижується до величини  $P_{гв}$ , яка менша за сталий тиск нагнітання, відбувається вторинний гідророзрив пласта. І процес нагнітання на цьому закінчується – тиск в свердловині різко знижується до мінімального рівня  $\sim 2$ МПа і в цей момент появляється одиничний витік рідини на вибої.

Ми спостерігали цей процес на шахті «Жданівська 3/4», де нам випадково пощастило вести нагнітання під відповідним тиском в прохідницькому вибої, який вірогідно не знаходився в гранично напруженому стані. Бародинаміка цього процесу ідентична гідровіджиманню, але ніякого помітного висування вибою не спостерігалось.

Якщо тиск нагнітання в свердловину, яка не знаходиться в гранично напруженому стані буде менший, ніж тиск гідророзриву  $P_{гв}$  зволоженого пласта, то вторинний гідророзрив не відбудеться (лінія 4) і тиск нагнітання буде залишатися стабільним, або трохи зменшуватися і після появи витоків на вибої пласта.

Викладені вище міркування показують, що спостереження за бародинамікою нагнітання (змінюю тиску плинном часу) дозволяє визначити характер напруженого стану пласта в місці розташування свердловини.

Ця досить оперативна інформація про напружений стан масиву, яка отримана з додаткового не залежного джерела дозволяє, в подальшому, вдосконалити якість сейсмоакустичного моніторингу конкретних виробок системою АПСС шляхом зіставлення акустичного спектру з результатами періодично здійснюваних нагнітань.

Крім того, результати наведених досліджень дають змогу суттєво вдосконалити методики гідро обробки пласта.

Методики проти викидної гідро обробки сформувалися у колишньому СРСР десь 60 років тому, і з тих часів зазнали лише одну істотну зміну – гідровіджимання вугільних пластів України було визнано небезпечним і зараз не використовується. Вони розроблялися виходячи з уявлення про необхідність систематичного проведення цих заходів. Постійне проведення заходу дає змогу спочатку провести певний обсяг дослідних нагнітань з метою визначення раціональних параметрів процесу. А в подальшому виконувати планові заходи з цими параметрами.

З тих часів на Україні змінилися гірничо-геологічні умови видобутку вугілля, а також значно скоротилася кількість викидонебезпечних пластів. Ці зміни обумовили відмову від систематичного застосування проти викидної гідрообробки і перехід до її періодичного застосування. Зараз необхідність такої гідрообробки визначається несприятливим прогнозом динаміки газовиділення з пласта. І тільки в цьому випадку здійснюється гідро обробка.

Перехід з систематичного до періодичного застосування гідро обробки знецінює раз і назавжди встановлені її параметри. Тому виникає нагальна потреба такого вдосконалення методики, яке дасть змогу ефективно обробляти масив першою ж свердловиною без проведення попередніх дослідних нагнітань.

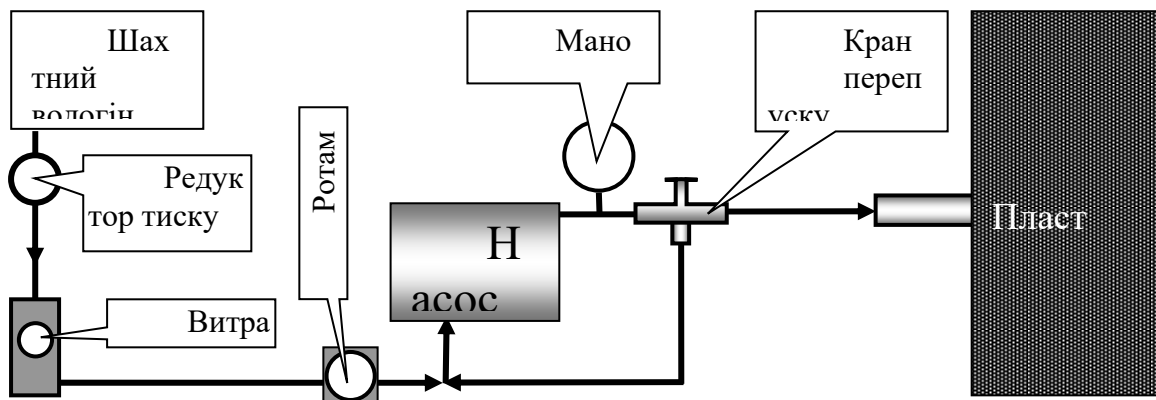
Вдосконалена методика базується на викладених вище результатах досліджень і містить в собі визначення тиску гідророзриву сухого пласта  $P_{гс}$ , вибір тиску нагнітання  $P_{н}$ , оцінку напруженого стану пласта та ступінь його розвантаження після гідрообробки:

### 1. Тиск нагнітання.

Вирішальне значення для процесу має правильно підібраний тиск нагнітання. Він не повинен бути занадто малим, бо в цьому випадку сильно виростає тривалість ефективної обробки свердловини. Але ще гіршими можуть бути наслідки застосування зовеликого тиску нагнітання. В цьому випадку настає гідророзрив пласта на початковій стадії нагнітання (див. лінію 1 мал. 3.12) і свердловина становиться не придатною для подальшої обробки.

Оцінка допустимого тиску в свердловині  $P_c$  наведена в нормативному документі [1] у вигляді співвідношення  $P_c \geq 0,75 \gamma H$ , але її недостатньо. По-перше, вона не визначає верхню межу тиску нагнітання, а по друге – величина гірського тиску суттєво змінюється повздовж свердловини з ростом відстані від її гирла [2]. Тому допустимий тиск в свердловині треба визначати на початковій стадії нагнітання.

Звичайно для цього користуються індикаторним методом [3]. Схема обладнання показана на малюнку 5.



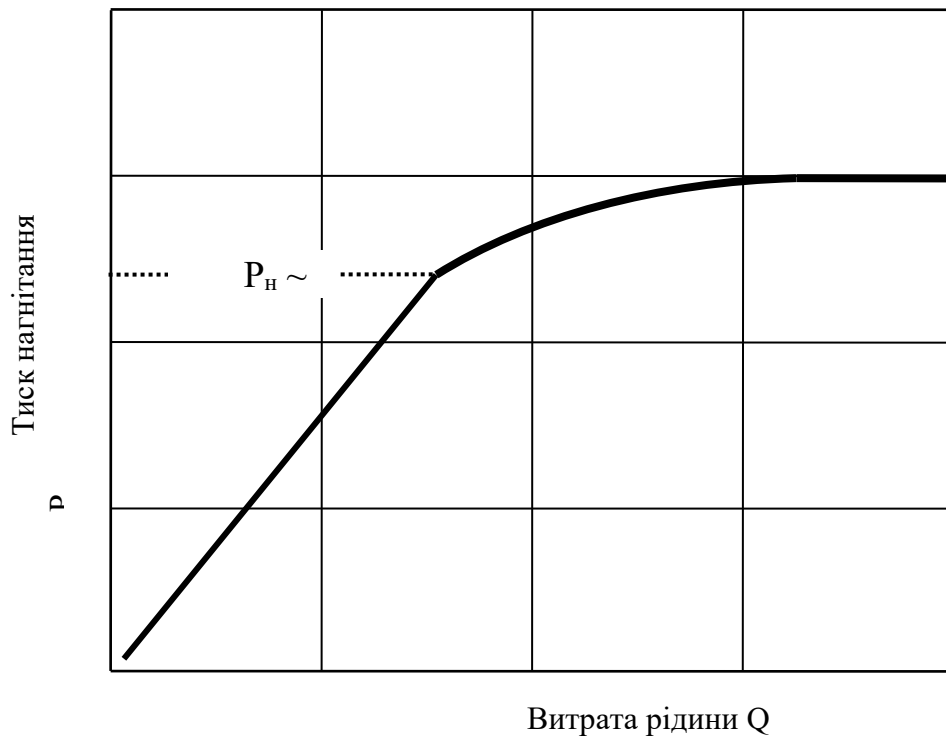
Малюнок 5 – Гідравлічна схема визначення граничного тиску індикаторним методом за допомогою ротаметру

Витрата води в свердловину регулюється шляхом її перепуску з нагнітальної у всмоктувальну магістраль. Витрата вимірюється ротаметром.

Перед включенням насосної установки перепускнув кран повністю відкривається і весь потік води з насоса повертається в його всмоктувальну магістраль. При цьому тиск в свердловині дорівнює тиску у всмоктувальній магістралі насоса. Потім перепускнув кран поступово прикривається, у всмоктувальну магістраль повертається вже не весь потік води з насоса – частина його надходить в пласт, а тиск в свердловині підвищується. Для певних значень тиску в свердловині  $P_1, P_2, P_3 \dots$ , вимірюються значення витрати води  $Q_1, Q_2, Q_3 \dots$

Якщо тиск нагнітання підвищувати кожного разу на одну і ту ж величину, наприклад  $\Delta P = 2 \text{ МПа}$ , то витрата води в свердловину на початку процесу буде збільшуватися теж на одну і ту ж величину  $\Delta Q$ . Але при наближенні тиску до його граничного значення – гідророзриву сухого пласта  $P_{гс}$  приріст витрати буде поступово зменшуватися при тому ж прирості тиску  $\Delta P$  як це показано на малюнку 6. На останній стадії процесу тиск перестає реагувати на підвищення витрат води через розвиток тріщин в пласті, залишаючись постійною величиною – граничним тиском нагнітання  $P_{гс}$ .

На перший погляд ця класична методика вирішує нашу задачу. Однак в буденних умовах виникають певні складнощі – стандартний витратомір мало придатний для швидкого вимірювання витрати. Його основна функція – вимір загального обсягу закачаної в пласт рідини. Тому для миттєвої оцінки витрати треба користуватися додатковим пристроєм –



Малюнок 6 – Індикаторна діаграма

ротаметром, розташованим послідовно з витратоміром. Обидва ці прилади не розраховані на роботу під високим тиском. Вони розміщуються виключно на лінії гідравлічного живлення насосу від шахтного водогону, але оскільки і в ньому тиск завеликий, то перед ними обов'язково повинен бути редуктор тиску (див. мал. 5).

В умовах прохідницької виробки застосування такої схеми великих складнощів не визиває. Там персонал може одночасно слідкувати за показниками манометра на напірній магістралі насосу, ротаметра на лінії його живлення, та станом вибою зі свердловиною. А в очисному вибої такої можливості нема. Насос розташований в конвеєрному штреку у складі енергопоїзду, там же на лінії живлення повинні розміщуватися прилади виміру витрати води. А напірна лінія від насосу прокладена в лаві, де свердловина може розташовуватися на відстані сотень метрів від насосу. І там же перебуває персонал, зайнятий гідро обробкою. Ці люди бачать стан вибою зі свердловиною в лаві та тиск на манометрі напірної лінії, але не бачать показника витрати по ротаметру в штреку на лінії живлення насосу.

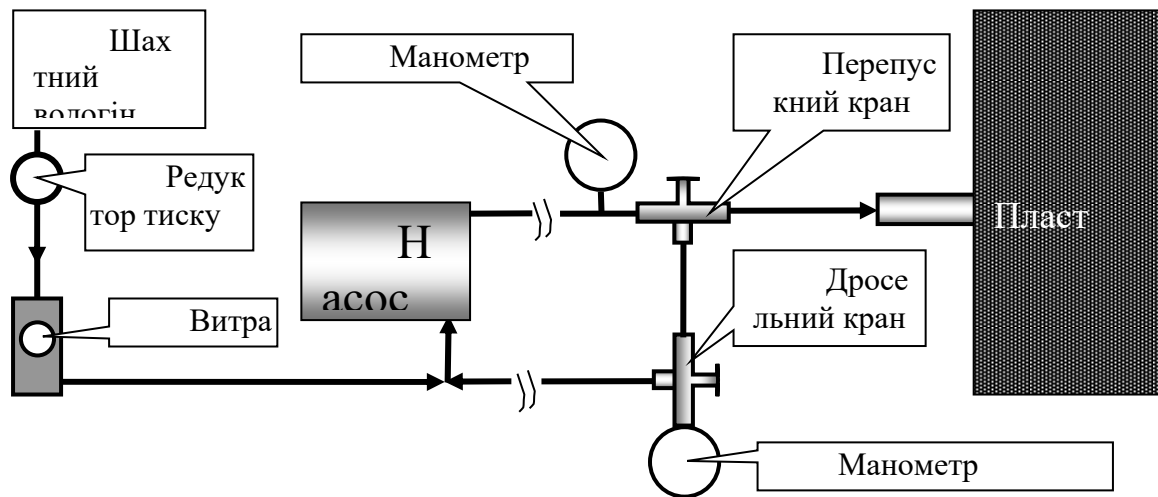
Ці технологічні складнощі знецінюють застосування стандартного індикаторного методу для оперативної оцінки допустимого тиску нагнітання.

Уникнути цих складнощів можливо при застосуванні замість ротаметру додаткового індикаторного манометру як показано на малюнку 7.

Перед початком нагнітання перепускний і дросельний крани повністю відкриті. Після вмикання насосу показники обох манометрів будуть приблизно однаковими і дорівнюватимуть тиску, в зливній магістралі куди скидається вся рідина. В подальшому дросельний кран трохи прикривається, на ньому виникають втрати тиску і частина рідини починає поступати в пласт. Показники обох манометрів будуть також однаковими. Дросельний кран прикривається доти, доки стрілка на шкалі індикаторного манометра не дійде до 70÷80% максимального для нього значення.

Після цього починається поступове прикриття перепускного крану. Тиск на напірному манометрі починає зростати, а на індикаторному – навпаки – знижуватися. Зниження тиску індикаторного манометра обумовлено зниженням витрати води через дросельний кран і зливну магістраль в цілому.





Малюнок 7 – Гідравлічна схема визначення граничного тиску за допомогою індикаторного манометру

Тож, якщо при тому ж самому темпі зростання тиску на напірному манометрі падіння тиску на індикаторному манометрі помітно уповільнюється, це свідчить про наближення до гідророзриву пласта. **Ми рекомендуємо** подальші виміри вести шляхом зворотно імпульсного підвищення тиску напірного манометру коли він трохи підвищується і тут же знижується до початкової величини [4]. Якщо в момент підвищення тиску напірного манометру тиск на індикаторному манометрі не змінюється, то ми досягли тиску гідророзриву сухого пласта.

Значення тиску гідророзриву сухого пласта  $P_{гс}$  фіксується, а тиск  $P_n$  в напірній магістралі знижується на 20÷30%.

Важливим є встановлення цих параметрів ( $P_{гс}$  та  $P_n$ ) на початковій стадії гідрообробки протягом ~ 5хвилин.

## 2. Напружений стан пласта.

Оцінка характеру первинного напруженого стану пласта здійснюється шляхом спостереження за зміною тиску нагнітання плинном часу – бародинамікою – при незмінних положеннях перепускного та дросельного кранів.

Поступове зниження тиску плинном часу – екстремальна бародинаміка – свідчить про те, що до початку гідрообробки пласт знаходився в гранично напруженому стані.

Стабільний тиск нагнітання – асимптотична бародинаміка – свідчить про те, що до початку гідрообробки пласт не знаходився в гранично напруженому стані.

Ці дані передаються диспетчеру сейсмічного прогнозу.

## 3. Ступінь розвантаження пласта після гідрообробки.

Визначається зіставленням тиску гідророзриву сухого пласта  $P_{гс}$  з кінцевим тиском нагнітання  $P_k$  при екстремальній бародинаміці – коли тиск нагнітання плавно знижується протягом гідрообробки (лінія 2 мал. 4), а пласт перебуває в гранично напруженому стані.

Для пласта, який не знаходиться в гранично напруженому стані і має асимптотичну бародинаміку, ступінь розвантаження пласта визначається в залежності від наявності вторинного гідророзриву.

Якщо вторинний гідророзрив (лінія 3 мал. 4) стався, то розвантаження пласта визначається зіставленням тиску гідророзриву сухого пласта  $P_{гс}$  з тиском нагнітання  $P_n$ . Якщо ж протягом всієї гідрообробки вторинного гідророзриву не спостерігалось, то перед її припиненням підвищують тиск перекриваючи перепускний кран (мал. 7) доти, доки не станеться вторинний гідророзрив. Розвантаження пласта визначається зіставленням тиску гідророзриву сухого  $P_{гс}$  і волого пласта  $P_{гв}$ .

Наведені рекомендації дозволяють підвищити ефективність гідрообробки пласта.

#### 4. Висновки

1. Характер напруженого стану пласта визначається формою бародинамічної кривої – зміни тиску нагнітання плинном часу.

Поступове зниження тиску плинном часу – екстремальна бародинаміка – свідчить про те, що до початку гідро обробки пласт знаходився в гранично напруженому стані. І внаслідок знеміцнення вугілля при його зволоженні починається тріщино утворення під дією гірського тиску.

Стабільний тиск нагнітання – асимптотична бародинаміка – свідчить про те, що до початку гідро обробки пласт не знаходився в гранично напруженому стані. В цьому випадку пласт розвантажується без тріщино утворення по деформаційному механізмі – за рахунок підвищення податливості зволоженого вугілля.

2. При асимптотичній бародинаміці може спостерігатися вторинний гідророзрив пласта – внаслідок його деформаційного розвантаження. Умовою його виникнення є тиск нагнітання  $P_n$ , який повинен бути нижче тиску гідророзриву сухого вугілля  $P_{гс}$ , але вище тиску гідророзриву вологого вугілля  $P_{гв}$ :  $P_{гв} < P_n < P_{гс}$ .

3. Застосування двох манометричної схемі вимірювання параметрів нагнітання дозволяє ефективно обробляти масив першою ж свердловиною без проведення попередніх дослідних нагнітань.

Технологія гідрообробки включає визначення зворотно імпульсним індикаторним методом тиску гідророзриву сухого вугілля  $P_{гс}$  на першій стадії нагнітання, та в разі потреби – тиску гідророзриву вологого вугілля  $P_{гв}$  в кінці нагнітання. Вона дозволяє отримати оперативну оцінку розвантаження пласта по цих гідравлічних параметрах.

#### Список використаних джерел:

1. Напорна фільтрація у вуглепородному масиві: моногр. / С.П. Мінеєв, О.О. Усов, Ю.Є. Поляков. – Дніпро : Видавець Біла К.О., 2021. – 260 с.

2. Круковский А.П. Влияние обработки угля водой и антипирогенами на формирование поля напряжений вокруг горной выработки / А.П. Круковский, В.В. Круковская, О.А. Усов : Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепр, 2020. – № 150. – С. 116-126.

3. Минеев С.П. Экспериментальное определение допустимого давления гидрорыхления угольного пласта по импульсной индикаторной диаграмме/ С.П. Минеев, Ю.Е. Поляков, О.А. Усов : Форум гірників – 2018: матеріали міжнар. конф, 10-13 жовтня 2018р., м. Дніпро – Д...Національний гірничий університет, 2018. с.251-256.

#### References

1. Napornaya fil'tratsiya v ugleporodnom masive [Pressure filtration in coal-rock mass] / S.P. Minêev, O.A. Usov, YU.Ye. Polyakov (2021). Dnepr : Vidavets' Belaya E.A.

2. Krukovskiy A.P. Vliyaniye obrabotki uglya vodoy i antipirogenami na formirovaniye polya napryazheniy vokrug gornoy vyrabotki [Influence of coal treatment with water and antipyrogens on the formation of stress fields around the mine working]/ A.P. Krukovskiy, V.V. Krukovskaya, O.A. Usov : Geotechnical Mechanics: Interv. Sat. scientific. tr. / IGTM NAS of Ukraine. - Dnipro, 2020. - No. 150. - P. 116-126.

3. Mineyev S.P. Eksperimental'noye opredeleniye dopustimogo davleniya gidrorykhleniya ugol'nogo plasta po impul'snoy indikatornoy diagramme [Experimental Determination of the Permissible Hydraulic Loosening Pressure of a Coal Seam Using a Pulse Indicator Diagram]/ S.P. Mineyev, YU.Ye. Polyakov, O.A. Usov: Miners' Forum - 2018: materials of the international. conference, October 10-13, 2018, Dnipro - D... National Mining University, 2018. p.251-256.