**Реферат**

роботи на здобуття премії Президента України

для молодих вчених у 2018 році «**Інтенсифікація розробки газовугільних родовищ з урахуванням особливостей колекторів метану**»

Комплексне освоєння газовугільних родовищ в умовах складного стану в енергетиці України здатне забезпечити енергетичну незалежність держави та дає потужний поштовх розвиткові національної економіки й оперативно розв’язує низку екологічних і соціальних проблем на державному рівні. Але підвищення навантаження на очисні вибої, а також конкурентно-спроможність шахтного фонду України та його відповідність сучасному рівню гірничої техніки, неможливі без збільшення ефективності дегазації вугільних пластів. Удосконаленню способів видобутку вугілля і утилізації шахтного метану сприяють наукові дослідження структури, колекторських властивостей викопного вугілля, масопереносу метану у вугільному пласті.

Незважаючи на великий обсяг виконаних досліджень на даний час недостатньо вивчені характеристики вугільної речовини, закономірності зміни колекторських властивостей викопного вугілля, що супроводжуються змінами мікроструктури, які викликані відмінностями гірничогеологічних умов в зонах залягання різних вугільних пластів, особливості масопереносу метану у неоднорідному вугільному пласті. Вітчизняні та закордонні спеціалісти накопичили достатній досвід поточної дегазації, що здійснюється під час підробки свердловин очисними вибоями. Проте відсутнє обґрунтування щодо параметрів поточної дегазації газовугільного масиву, узгодженості її параметрів з параметрами очисних робіт. Недостатньо уваги приділено цілісності дегазаційних свердловин під час їх підробки очисними вибоями та причинам їх незадовільного стану.

**Метою роботи** є встановлення оптимально узгоджених параметрів процесів вуглевидобутку й дегазації виїмкової дільниці газовугільного родовища.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Уперше показано вплив генезису вугілля, що виявляється в збільшенні числа парамагнітних центрів, на збільшення метаноносності однаково метаморфізованого вугілля.

2. Уперше експериментально визначена енергія активації виходу метану зі зволоженого вугілля, яка відповідає умовам його залягання на глибинах близько 1000 метрів.

3. Уперше експериментально методом ЯМР встановлено зміну співвідношення функціональних груп у аліфатичній структурі вугільної речовини у викидонебезпечному вугіллі, яке перебуває під дією високих геодинамічних навантажень, що викликано механохімічними реакціями, які відбуваються у вугіллі, з виділенням вільних вуглеводнів.

4. Уперше експериментально досліджено кінетику десорбції газів з вугілля після насичення в умовах газових тисків близько 2000 атмосфер і встановлено характерні часи десорбції для них.

5. Уперше встановлено, що руйнування дегазаційних свердловин пробурених із земної поверхні здійснюється у вигляді перерізу їх стовбурів, який виникає внаслідок зміщень суміжних породних шарів відносно один одного в площині нашарування.

6. Уперше доведено, що переріз стовбура свердловин виникає на контактах обводнених пісковиків з водостійкими підстилаючими породами (аргілітами, алевролітами).

7. Уперше встановлено, що зі зростанням швидкості посування очисного вибою загальний дебіт дегазаційних свердловин, що підроблюються, зростає згідно логарифмічної залежності.

8. Уточнено, що величина перерізу стовбурів свердловин визначається степеневою залежністю від співвідношення відстані від площини контакту зазначених шарів до вугільного пласта, що відпрацьовується, і його потужності та обернено пропорційна швидкості осування очисного вибою.

9. Уточнено залежність проникності газовугільного масиву від напружень, обумовлених гірським тиском та положенням дегазаційної свердловини відносно виробленого простору.

10. Отримало подальший розвиток уявлення про взаємодію дегазаційної свердловини з очисним вибоєм в умовах інтенсивного відпрацювання вугільних родовищ.

**Наукові результати отримано на основі комплексних натурних інструментальних спостережень, експериментальних та теоретичних досліджень**, спрямованих на визначення характеристик вугілля, що впливають на його колекторські властивості, параметрів масопереносу метану у неоднорідному вугільному пласті, встановлення закономірності динаміки взаємодії стовбура дегазаційної свердловини з очисним вибоєм, розробку методики визначення небезпечних деформацій дегазаційних свердловин й обґрунтувати заходи з їх усунення, визначення залежності дебіту дегазаційних свердловин від швидкості посування очисних вибоїв, що їх підроблюють, узгодження параметрів дегазації й очисних робіт.

Для дослідження мікро- і наноструктури вугільної речовини використані сучасні методи ядерного магнітного резонансу (ЯМР) широких ліній (безперервний і імпульсний) на ядрах 1Н, ЯМР високого розділення на ядрах 13С, електронного парамагнітного резонансу (ЕПР), спектроскопія комбінованого розсіювання світла (КРС). Стан флюїдів у вугіллі вивчався гравіметричним методом і методами ЯМР широких ліній із застосуванням методів фізики високих тисків. Теоретичні дослідження виконано з застосуванням методів математичного моделювання.

Експериментальними дослідженнями встановлено кількісне співвідношення різних фаз метану в насиченому газом вугіллі в залежності від тиску, що діє на систему вугілля-газ. Вивчені особливості кінетики десорбції метану з кам’яного вугілля, визначені характерні часи десорбції, які змінюються при зміні ступеня метаморфізму (з чим пов’язані зміни наноструктури вугільної речовини і тріщинувато-пористої структури, відповідно конкретної марки вугілля).

Було показано, що у зволожених зразках вугілля молекули води в результаті дипольної взаємодії з активними центрами поверхні пор знижують загальну метаноємність, приводячи до зменшення енергії активації десорбції метану. Наслідком такого впливу є прискорення процесу емісії метану з вугільних зразків. На великих глибинах під впливом високих тисків і температур, можуть бути створені умови підвищеного газовиділення за рахунок перерозподілу сорбованих флюїдів в структурі вугільної речовини. Зменшення енергії зв’язку метану в сукупності з іншими факторами призводить до збільшення ефективного коефіцієнта дифузії, що характеризує швидкість газовиділення. Було зроблено висновок, що на великих глибинах залягання вугілля близько 1000 м в присутності вологи енергія активації виходу метану *Е*а зменшується в 3 рази, в порівнянні з сухим вугіллям, що призводить до збільшення емісії метану з вугільного пласта.

В результаті дослідження взаємозв’язку кількості метану і води, які містяться у вугіллі, з його наноструктурою було показано, що сорбційний об’єм, в якому міститься метан, визначається не тільки порами (відкритими і закритими), а й самою наноструктурою вугілля. Метан проникає безпосередньо в вугільну структуру і сорбується сорбційними центрами, що виникають на обірваних ароматичних і сполучено-ланцюгових зв’язках фрагментів структури вугілля, тоді як вода адсорбується центрами, розташованими на поверхні пор. Можливо, цим і пояснюється той факт, що середня газоносність вугілля з метаморфізмом зростає, в той час як загальна пористість на даній ділянці метаморфізму падає.

Вивчено закономірності перетворення аліфатичної структури вугілля під дією гірничо-геологічних умов, що змінюються, і високого тиску. Показано, що структурні перетворення в викидонебезпечному вугіллі, які відбуваються під дією високих геодинамічних навантажень, супроводжуються відривом значної кількості метильних функціональних груп з макромолекул вугільної речовини з їх подальшою можливою асоціацією з хімічно активними компонентами аліфатичної структури вугілля у вільні легкі вуглеводні.

Завданням теоретичного дослідження було математичне моделювання фільтрації метану «повного циклу»: формулювання моделей, знаходження вихідних даних чисельних значень усіх параметрів (попередній етап моделювання) та чисельна реалізація моделей – отримання придатних для подальшого аналізу графіків, що відображають динаміку полів тисків і дебітів метану.

Було показано, що моделювання процесів фільтрації метану, що десорбується в неоднорідному пласті вугілля, може бути здійснене на основі системного підходу, що включає в себе нові аналітико-чисельні методи розв’язання крайових задач фільтрації у неоднорідних середовищах. Отримано аналітичні розв’язання задач фільтрації у двох моделях, перша з яких ординарна, а друга – двошарова крайова задача, яка має просту, зручну для інженерних розрахунків, форму. Проведено чисельне моделювання полів тисків і дебітів метану для чотирьох наборів граничних гірничо-геологічних та фільтраційних параметрів і різних моментів часу. Встановлено, що отримані дані узгоджуються якісно і кількісно з експериментальними, дозволяють аналізувати вплив параметрів на поля тисків і дебіти метану і вирішити зворотну задачу.

Сформульовано практично значущі моделі метановіддачі вугільних пластів. Отримані в результаті моделювання рішення можуть служити зручною базою для розробки різних інженерних розрахункових методик, необхідних для вдосконалення багатьох аспектів вугле - і газовидобутку підземним способом.

**За об’єкт прикладного дослідження** обрано ПрАТ «ШУ «Покровське», яке відпрацьовує поодинокий вугільний пласт *d*4 і є самим продуктивним вугледобувним підприємством України. Річний видобуток рядового вугілля протягом багатьох років становить 5 – 7 млн. т, а середньодобовий сягає 15 – 18 тис. т. При цьому метановиділення у гірничі виробки на виїмкових дільницях сягає 35 – 45 м3/хв.

Вивчення ефективності дегазації здійснювалось на основі аналізу дебіту метану залежно від посування очисного вибою і відстані від вказаного вибою до вертикальної дегазаційної свердловини. Було розроблено новий оригінальний пристрій для прямих спостережень деформацій стовбура дегазаційних свердловин. Вказані деформації фіксуються за допомогою цифрової камери, що спускається у свердловину на спеціальному тросі. Був сконструйований спеціальний водотривкий корпус та випробуваний на стенді у МакНДІ. Випробування довели, що підводну зйомку можна безпечно виконувати до глибини 800 м. Це достатньо для вивчення деформацій дегазаційних свердловин у процесі розробки переважної більшості українських газовугільних родовищ.

Для вивчення динаміки напружено-деформованого стану дегазаційної свердловини і оточуючого її масиву у зоні активних зрушень застосовувались тривимірні чисельні комп’ютерні моделі, зокрема сучасна потужна спеціалізована платформа FLAC3D. Вказаний програмний пакет враховує час протікання процесів і дає можливість моделювати послідовні задачі, коли рішення однієї задачі використовується як початкові умови для наступної.

Метановиділення виїмкових дільниць і досягнута фактична ефективність дегазації оцінювалися за результатами спостережень шахти і змінних газових зйомок. Вимірами визначалися: середня витрата газової суміші, дебіт і вміст метану в гірничих виробках і газопроводах. Спостереження виконувались з дотриманням нормативних документів.

Проникність тріщинуватого масиву гірських порід у зоні впливу очисних робіт вивчалась як функція тріщинуватості, параметри якої досліджувались на основі статистично представницьких вимірів розкриття тріщин, відстані між ними, кутів та азимутів падіння. Аналіз тріщинуватості здійснювали за допомогою рівноплощадних стереографічних проекцій Каврайського.

Проведено дослідження ефективності застосування поточної дегазації свердловинами із земної поверхні при підземному видобуванні вугілля. Виконано моделювання взаємодії очисного вибою і дегазаційних свердловин. Встановлено, що величина небезпечних деформацій зменшується зі збільшенням відстані від виробленого простору очисного вибою до точки, в якій визначається деформація. Рівень небезпечних деформацій зростає по мірі відходу очисного вибою від монтажної камери. Аналіз стратиграфічних розрізів вуглевміщуючої товщі, що підроблювалась очисним вибоєм, дозволив встановити найбільш вірогідні ділянки, на яких ймовірність руйнування стовбура дегазаційної свердловини максимальна. Встановлено, що такі ділянки приурочені до контактів підошов водоносних пісковиків і шарів аргілітів або алевролітів, що містять значну кількість глинистих мінералів.

За допомогою цифрової камери, розміщеної у герметичному корпусі, яка опускалася у свердловини, було встановлено, що руйнування дегазаційних свердловин, дійсно, відбувається у результаті зсувів на контактах породних шарів під дією дотичних напружень, що призводить до перерізування стовбура свердловин.

Дослідження зональності концентрації метану по площі виїмкових дільниць та оцінка ефективності дегазації окремими технологіями (підземними свердловинами, газовідсмоктуванням через свічки, свердловинами з поверхні) показало, що завдяки дегазаційним свердловинам, пробуреним із земної поверхні вдалось підвищити щодобовий видобуток вугілля з очисних вибоїв на 850 т. Проте ефективність поверхневих свердловин у 1,37 рази менша, ніж підземних дегазаційних свердловин і в 1,6 рази ніж ефективність свічок. Враховуючи, що коефіцієнт варіації продуктивності поверхневих свердловин сягає 108%, можна зробити висновок про значний резерв, який закладений у можливості дегазаційних свердловин, пробурених із земної поверхні. Для ефективного використання вказаного резерву було розроблено методику визначення місцеположення ділянок, на яких можуть руйнуватися дегазаційні свердловини під час їх підробки очисним вибоєм, та способи захисту свердловин від такого руйнування.

Досліджена залежність дебіту дегазаційних свердловин від швидкості посування очисних вибоїв, що їх підроблюють, на основі чого узгоджені параметри дегазації й очисних робіт. Встановлено, що дебіт дегазаційних свердловин, які пробурені з земної поверхні знаходиться у логарифмічній залежності від швидкості посування очисного вибою, що підроблює ці свердловини. Проте збільшення видобутку метану зі свердловин непропорційно зменшує виділення вибухонебезпечного газу у робочий простір очисного вибою. Як показали спільні дослідження ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України і ПрАТ «Донецьксталь», підвищення темпів посування лави призводить до того, що частка газу з супутників і газоносних пісковиків, яка поступає у робочий простір вибою зменшується. Як наслідок, коефіцієнт корисного дебіту свердловин знижується.

Проведені дослідження показали, що коефіцієнт ефективного дебіту з робочого простору лави *k* зменшується зі зростанням швидкості лави *v* згідно обернено пропорційної залежності:

*k* = -0*,*0048*v* + 1*,*58,

де *v* - швидкість посування очисного вибою, м/міс.

Встановлено, що втрата ефективності дегазаційної свердловини компенсується вибором оптимальних параметрів розташування свердловин завдяки вчасному їх бурінню.

Проведеними дослідженнями обґрунтовано параметри технології ведення очисних робіт високонавантажених лав і дегазації вуглегазової товщі масиву гірських порід свердловинами з земної поверхні. Для захисту дегазаційної свердловини від перерізування її стовбура на контактах водоносних пісковиків й аргілітів або алевролітів був розроблений і запатентований новий спосіб дегазації, який базується на застосуванні спеціальної форми дегазаційної свердловини, що буриться із земної поверхні.

Було показано, що підвищення швидкості посування очисного вибою є також дієвим прийомом для зменшення зсувів породних шарів відносно один одного. Встановлено, що раціонально комбінувати способи захисту дегазаційних свердловин: для збереження газопровідної ділянки дегазаційної свердловини доцільно збільшувати швидкість посування лави, або зміщувати цю ділянку убік від зони небезпечних дотичних деформацій товщі, яка підроблюється. Натомість захист перехідної ділянки, як найбільш небезпечної, здійснюється нахилом її осі до нашарування у комбінуванні з підвищенням швидкості.

**Основні науково-практичні результати роботи полягають у наступному:**

1. Встановлено, що головними факторами, які знижують ефективність дегазаційних свердловин, що пробурені з земної поверхні, є їх руйнування у зоні активних зрушень під час підробки очисним вибоєм, зменшення проникності масиву під дією гірського тиску, кольматації та скін-ефекту газоприймальної ділянки свердловини, а також заповнення підземними водами.

2. Доведено, що руйнування дегазаційної свердловини відбувається у вигляді перерізування її стовбура внаслідок проковзування суміжних породних пластів відносно один одного.

3. Встановлено, що цілісність дегазаційної свердловини під час підробки очисним вибоєм досягається ухиленням від перерізування її стовбура на контактах газоносних пісковиків і породних шарів водотривких аргілітів й алевролітів та нахилом осі свердловини під гострим кутом до нашарування завдяки вибору спеціальної криволінійної форми осі дегазаційної свердловини, що дозволяє зберегти високу продуктивність свердловини у зоні активних зрушень і підвищити ефективність дегазації.

4. Отримані теоретичні рішення задач фільтрації метану у неоднорідних пластах вугілля, що дозволяє змоделювати метановіддачу вугільних пластів.

5. Методом ядерного магнітного резонансу було визначено розподіл метану по фазових станах в структурі вугілля. Вивчено перерозподіл вмісту метану між фазами при зміні тиску.

6. В результаті дослідження процесів насичення/дегазації встановлено, що вихід газу із зразків вугілля може бути описаний двома механізмами – фільтраційним та дифузійним. А характерний час виходу газів для дифузійного механізму, в порівнянні з фільтраційним відрізняються в кілька разів.

7. Показано, що на великих глибинах залягання вугілля близько 1000 м в присутності вологи енергія активації виходу метану знижується у 3 рази, в порівнянні з сухим вугіллям, що призводить до збільшення емісії метану. Фізичним механізмом прискорення емісії метану в умовах високого тиску у вугільних шахтах на великих глибинах є активна роль молекул Н2О, які заміщають молекули СН4 на активних центрах сорбції поверхні порового простору вугільної речовини.

8. В результаті проведених ЯМР-досліджень отримано залежності часів магнітної релаксації спінів протонів у вугіллі від вологості, які характеризують відмінності пористої структури вугілля в залежності від стадії метаморфізму для вугільних пластів, розташованих на одному горизонті.

9. У результаті проведених комплексних досліджень встановлено, що сорбційний об’єм, в якому міститься метан у вугіллі, визначається не тільки порами (відкритими і закритими), а й самою наноструктурою вугілля. Показано, що зміна структури вугілля однакового ступеню метаморфізму, яка пов’язана зі збільшенням числа парамагнітних центрів, призводить до збільшення здатності вугілля утримувати у своїй структурі метан і до зростання метаноносності відповідних вугільних пластів.

10. Встановлено, що структурні перетворення у викидонебезпечному вугіллі, що відбуваються під дією високих геодинамічних навантажень, супроводжуються відривом значної кількості метильних функціональних груп з макромолекул вугільної речовини з їх подальшою можливою асоціацією з хімічно активними компонентами аліфатичної структури вугілля у вільні легкі вуглеводні.

11. Розроблено методику визначення максимальної величини перерізування стовбура свердловини з урахуванням стратиграфічної будови товщі, через яку буриться дегазаційна свердловина, а також залежно від водоприпливів у водостійкі шари, вмісту глинистих мінералів, кратності підробки масиву очисним вибоєм та швидкістю його посування.

12. Встановлено, що зі зростанням швидкості посування очисного вибою загальний дебіт дегазаційних свердловин, що підроблюються, зростає згідно логарифмічної залежності, натомість частка метану, який відводиться з виїмкової дільниці вказаними свердловинами, лінійно зменшується, що компенсується підтриманням достатнього рівня ефективного дебіту за рахунок своєчасного введення нових свердловин.

13. Встановлено, що параметри дегазації й очисних робіт визначаються на основі швидкісного потокового буріння свердловин, раціональна відстань між якими повинна узгоджуватись з крайовою частиною вугільного пласта та швидкістю посування очисного вибою. Це забезпечує не тільки ефективну дегазацію очисних робіт, але й стійке постачання газоповітряної суміші на когенераційну станцію.

14. Результати досліджень впроваджені у практиці інтенсивного відпрацювання газовугільного родовища в умовах ш/у «Покровське». Завдяки вдалому поєднанню швидкісного буріння свердловин із земної поверхні та їх раціонального розташування відносно очисних вибоїв було видобуто 7,3 млн. м3 метану й досягнута рекордна виробнича потужність 8,3 млн. т, що перевищує показники 2011 рік на 1,4 млн. т. Зростання прибутку в розрахунку на рядове вугілля становить 182 млн. грн у порівняних цінах.

15. Практичні результати розробки авторів поширюються в галузі у вигляді інструкцій і методичних рекомендацій з дегазації свердловинами з земної поверхні, що затверджені Міністерством енергетики та вугільної промисловості України. Параметри дегазації газовугільного родовища увійшли в галузеві Вказівки НПАОП «Дегазація вугільних шахт. Правила безпечної експлуатації дегазаційних систем» і використовуються на шахтах Донбасу (ш/у «Покровське», ПрАТ «Донецьксталь»).

Загальна кількість публікацій авторів за темою роботи складає 36, в т.ч. 19 статей (3 – у зарубіжних виданнях). Згідно бази даних Scopus загальна кількість посилань на публікації авторів, представлені в роботі, складає —, h-індекс (за роботою) = —; згідно бази даних Google Scholar загальна кількість посилань - складає 2, h-індекс (за роботою) = 1.

Авторами отримано 2 патенти на винахід.

За даною тематикою захищено дві дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Автори роботи:

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ І.О. Дєдіч

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Т.В. Пічка

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ О.А. Камчатний

Підписи засвідчую:

Учений секретар ІФГП НАН України

д.т.н., с.н.с. \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ Н.О. Калугіна