УДК 622.807.002.54 (088.8)

І. В. Коц, к. т. н., доц.;
В. П. Надутий, д. т. н., проф.

УСТАНОВКА ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВИДОБУТКУ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ВУГІЛЬНОГО МЕТАНУ

Запропоновано конструктивне виконання устаткування для інтенсифікації видобутку та утилізації вугільного метану з використанням технології імпульсного нагнітання води у вугільний пласт, яка базується на застосуванні гідравлічного привода, керування яким здійснюється за допомогою гідравлічного генератора імпульсів тиску — автоколивального двоступінчатого чотириходового золотника. Наведено і обгрунтовано математичні залежності для визначення параметрів формування імпульсного струменя на виході нагнітального вузла і розглянуто процес проникнення імпульсного струменя води у вугільний пласт.

Постановка проблеми

Останнім часом дедалі частіше постає проблема метану вугільних родовищ, зокрема, під кутом зору можливості і доцільності промислового видобування й утилізації метану як альтернативного джерела енергії. За оцінками фахівців, загальні світові ресурси метану становлять від 93,4 до 285,2 трлн м^3. Серед країн, які мають найбільші його запаси, Україна посідає четверте місце — після Росії, Індії та Китаю. Наші ресурси метану оцінюються експертами у 12 трлн м^3. Для України ця проблема набуває особливої ваги з огляду на цілу низку обставин. Нині у вугільній галузі країни налічується близько 20 найпотужніших шахт, на яких, однак, існує надто висока вірогідність виникнення катастрофічних ситуацій від спалахів та вибухів метану. Пов'язано це з тим, що вітчизняні та зарубіжні технології дегазації уже не забезпечують надійного ведення гірничих робіт. Разом з тим реалізація Програми енергетичної безпеки України передбачає введення в дію дедалі більшої кількості шахт, серед яких є багато складних щодо газового чинника. Зважаючи на актуальність вирішення проблеми промислового видобутку метану, а також питань газової безпеки на вугільних шахтах протягом останніх років, була ухвалена ціла низка постанов Кабінету Міністрів України. У них відображено найважливіші напрями розробки та впровадження технологій поверхневої і підземної дегазації [1].

Ці обставини зумовлюють доцільність подальшого вдосконалення і розробки нового устаткування для інтенсифікації видобутку та утилізації вугільного метану.

Аналіз останніх досліджень

На сьогодні є вже позитивні результати розв'язання проблеми вугільного метану, зокрема, вченими Національної академії наук України разом з фахівцями галузевих установ Мінвуглепрому створено технологію дегазації, яка вперше у світі розділяє у часі та підземному просторі процеси видобутку двох енергоносіїв — газу і вугілля [1]. Метан за цією технологією вилучається через систему свердловин, зорієнтованих у заданому напрямку, і вони утворюють над вугільним пластом так званий газовий горизонт. Ця система дає змогу вилучати метан не тільки на всіх етапах видобування вугілля, а й одержувати його з раніше відпрацьованих пластів, не допускаючи у виробки, де працюють люди. Після відбору більшої частини газу добувають вугілля, і саме завдяки цьому істотно підвищується безпечність праці шахтарів. Отримані результати мають принципове значення, оскільки також дають змогу постійно вилучати значну кількість метану як альтернативного виду палива для його подальшої утилізації. Нині на шахті ім. О. Ф. Засядька реалізується найпотужніший у Європі проект комплексної дегазації та промислової утилізації метану [1—4].

Формулювання мети і задач дослідження

Мета досліджень — розробка установки для імпульсного нагнітання води у вугільний пласт та створення теоретичних основ для її розрахунку. Основні задачі: розроблення математичних моделей динаміки роботи гідропривода нагнітального вузла і процесу проникнення імпульсного струменя води

© І. В. Коц, В. П. Надутий, 2007

у вугільний пласт; дослідження на базі отриманих моделей загальних закономірностей гідродинамічних процесів в імпульсній установці та вугільному пластові, в який періодично подається визначена доза рідини; розроблення алгоритму та методик розрахунку, оптимізації параметрів та знаходження режимів ефективної імпульсної дії струменя на вугільний пласт при проектуванні подібного устаткування.

Виклад основного матеріалу

На рис. 1 зображена конструктивна схема запропонованого нами пристрою для імпульсного нагнітання води у вугільний пласт [5].

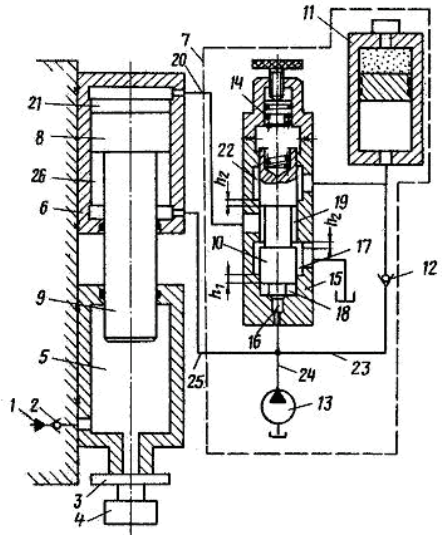

Рис. 1. Конструктивна схема установки для нагнітання води у вугільний пласт

Пристрій для імпульсного нагнітання води і керуючий ним генератор імпульсів тиску працюють так. З включенням привідного гідронасоса 13 (рис. 1) робоча рідина під тиском надходить з нагнітальної магістралі 24 по гідролінії 23 через зворотний клапан 12 в гідроакумулятор 11, проводячи його зарядку, і в порожнину управління 16 зі сторони торця першого ступеня двоступінчатого двопозиційного чотириходового золотника 10. Окрім того, робоча рідина надходить по гідролінії 25 в камеру 21 робочого ходу, здійснюючи переміщення поршня 8 зі штоком 9 в крайнє верхнє положення. Одночасно з переміщенням поршня 8 зі штоком 9 у верхнє положення з напірної водної магістралі 1 через зворотний клапан 2 відбувається подача порції води в напірну камеру 5. З досягненням поршнем 8 зі штоком 9 крайнього верхнього положення і закінченням зарядки гідроакумулятора 11, тиск робочої рідини зростає до величини, на яку налаштований зусиллям регульованої пружини 14 золотник 10. Зусилля регульованої пружини 14 вибирається, виходячи з величини необхідного робочого тиску в гідросистемі і площі поперечного перерізу першого ступеня золотника 10. Після подолання силою тиску робочої рідини зусилля регульованої пружини 14 відбувається відрив золотника 10 від сідла, і робоча рідина, що надходить в міжступінчату порожнину управління 18, починає діяти на збільшену площу другого ступеня. Оскільки зусилля від тиску робочої рідини суттєво перевищує зусилля регульованої пружини 14, то золотник 10 різко переміщується вгору, проходить перекриття h_1 і з'єднує при цьому кільцеву розточку 17 з порожниною управління 18 зі сторони більшого ступеня золотника 10.

Тиск робочої рідини у всіх порожнинах і гідролініях починає падати до зливного. Одночасно золотник 10, переміщаючись вгору і пройшовши перекриття h_2, здійснює закриття зв'язку за допомогою каналу 20 камери 21 робочого ходу із зливною кільцевою розточкою 17 і відкриває зв'язок їх з кільцевою розточкою 22, яка постійно зв'язана з гідроакумулятором 11. Робоча рідина з гідроакумулятора 11 надходить каналом 20 в камеру 21 робочого ходу і починає переміщати поршень 8 з штоком 9 у нижнє положення. У міру переміщення поршня 8 робоча рідина із взвідної камери 26 по гідролінії 25 видаляється на злив. Шток 9 переміщується в напірній імпульсній гідрокамері 5 вниз, стискаючи воду, що знаходиться там. Вода, що знаходиться в напірній імпульсній гідрокамері 5, витискається звідти переміщуваним вниз штоком 9, на який в даний момент діє сила тиску робочої рідини, що викидається з гідроакумулятора 11, через реле 3 тиску і герметизатор шпура 4 надходить у вугільний пласт. Коли поршень 8 з штоком 9 опускаються, тиск робочої рідини, що витісняється із взвідної камери 26, падає до мінімуму, при якому зусилля, встановлене регульованим гвинта 27 пружини 14, стає більшим ніж сила дії на поперечний переріз золотника 10 від тиску робочої рідини в порожнині управління 18 зі сторони торця другого ступеня. В результаті цього золотник 10 повертається в початкове нижнє положення і сідає на установочне сідло, перекриваючи зв'язок порожнини управління 16 зі сторони торця першої ступені зі зливною кільцевою розточкою 17. Цикл роботи генератора імпульсів тиску в пристрої для імпульсного нагнітання води у вугільний пласт повторюється в автоматичному режимі. Період затримки золотника 10 в нижньому положенні регулюється тривалістю зарядки гідроакумулятора 11 і тривалістю реверса поршня 8 зі штоком 9 гідроциліндра 6 двосторонньої дії. Затримка золотника 10 у верхньому положенні визначається часом витоку із взвідної камери 26, який залежить від регульованої величини потенційної енергії, накопиченої в гідроакумуляторі 11. Змінюючи регульованою

пружиною 14, за допомогою гвинта 27 величину настройки тиску спрацьовування золотника 10, а також продуктивність привідного гідронасоса 13 можна в широких межах варіювати частоту гідравлічних імпульсів, а також їх тривалість і об'єм порцій нагнітання води у вугільний пласт.

Підвищення ефективності нагнітання води у вугільний пласт в пропонованому пристрої, в порівнянні з відомими [2—4], досягається тим, що такі визначальні параметри як частота імпульсів нагнітання, об'єм порцій нагнітання води, величина тиску і тривалість імпульсного нагнітання можуть бути вибрані оптимальними, завдяки відповідній настройці двоступінчатого двопозиційного чотириходового золотника 10 і привідного гідронасоса 13.

Розглянемо деякі особливості розрахунку гідропривода установки для імпульсного нагнітання води у вугільний пласт. Для складання диференційного рівняння руху маси порції води, яка нагнітається у вугільний пласт за один імпульс, будемо вважати дану масу зосередженою, тобто $m_в = \rho Fs$, де ρ — густина води; F — площа поперечного перерізу штока 9 поршня 8 , що входить в робочу порожнину з водою 5; s — величина переміщення штока 9 поршня 8. Припустимо також, що гідроакумулятор 11 розряджається згідно лінійного закону, тобто $P_0 = cs$, де $P_0 = p_0 F$ — сила початкової дії на масу води, що викидається; p_0 — тиск в гідроакумуляторі 11 до початку розрядки; c — узагальнений коефіцієнт, що враховує розрядку гідроакумулятора 11. Припустимо, що гідравлічні опори в гідросистемі пропорційні квадрату швидкості переміщення штока 9 поршня 8, тобто $R_г = \alpha\upsilon^2$, де α — коефіцієнт гідравлічного опору; υ — швидкість переміщення штока 9. Масою поршня 8 зі штоком 9 нехтуємо.

З урахуванням прийнятих припущень, диференційне рівняння імпульсного розгону об'єму води, що нагнітається, можна представити як [6]:

$$\rho Fs\frac{d^2s}{dt^2} = P_0 - cx - \alpha\left(\frac{ds}{dt}\right)^2. \qquad (1)$$

Це рівняння перетворюємо до вигляду

$$\rho Fs\frac{d^2s}{dt^2} + \alpha\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 + cx - P_0 = 0\,, \qquad (2)$$

замінимо в ньому $z = \frac{ds}{dt}$, $\frac{d^2s}{dt^2} = z\left(\frac{dz}{dt}\right)$ і запишемо

$$\rho Fsz\frac{dz}{dt} + \alpha z^2 + cs - P_0 = 0, \qquad (3)$$

Це рівняння є окремим випадком рівняння Абеля [7]:

$$\frac{ds}{dt} = (\rho Fs)^{(-\alpha/\rho F)}\sqrt{2\int f(s)\,ds + C_1}, \qquad (4)$$

звідки

$$t = \int \frac{ds}{(\rho Fs)^{-(\alpha/\rho F)}}\sqrt{2\int f(s)\,ds + C_1}, \qquad (5)$$

де $f(s)\,ds = -\int (cs - P_0)(\rho Fs)^{(2\alpha/\rho F - 1)}\,ds$.

Підстановкою значень вихідних величин в рівняння (4) і (5) визначається швидкість та тривалість нагнітання води. Відповідним підбором швидкості та тривалості викиду струменя води забезпечується оптимальна проникність у вугільний пласт та інтенсивність його руйнування.

Гідроімпульсне нагнітання рідини всередину вугільного пласту — складний процес, який залежить від багатьох чинників. Тому з метою спрощення проектування пристроїв для гідроімпульсного внесення води, необхідно розробити аналітичні методи визначення величини проникнення струменів в вугільне пластове середовище, залежно від технологічних і конструкційних параметрів пристроїв для гідроімпульсної подачі рідини і фізико-механічних властивостей вугільного пласту.

Оскільки, описуючи процес проникнення струменя води у вугільний пласт, неможливо врахувати всі чинники, що впливають на процес, надалі будемо враховувати тільки деякі характерні чинники і введемо ряд припущень.

Основні припущення, прийняті для описання процесу проникнення струменя води у вугільний

пласт при гідроімпульсному нагнітанні, такі: вугільний пласт в місці дії струменя представляє собою однорідну, так звану, монодисперсну речовину, що складається з мінеральних частинок однакового розміру, в якій циркуляція рідини і явища просочування рідини в пори не враховуються; сила дії струменя води на вугільний пласт і опір вугільного пласту рівномірно розподілені за всією площею дії струменя при його вертикальному проникненні; струмінь води є нестисливим стрижнем діаметром d і довжиною S; переміщення площини контакту струменя з вугільний пластом — плоскопаралельне; Вугільний пласт у момент вертикального переміщення струменя води піддається тільки стисненню, опір вугільного пласту різанню і розклинюванню не враховується.

Розглянемо фрагмент 1—2 струменя рідини площею поперечного перерізу ω і довжиною S, який переміщується вертикально вниз з деякою швидкістю v, набутою в результаті дії на рідину в гідроімпульсній камері високого тиску (рис. 2). Рідину будемо вважати ідеальною: нехай в ній відсутні дотичні напруги і вона не стискається.

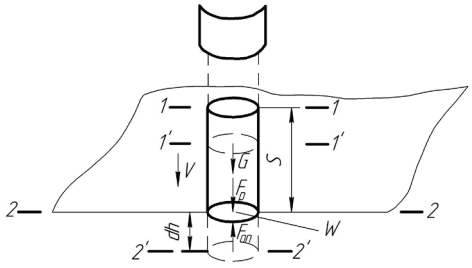

Рис. 2. Схема переміщення фрагмента струменя рідини у вугільному пласті

Передбачимо, що за нескінченно малий проміжок часу цей фрагмент перемістився в вугільний пласт на відстань dh у нове положення 1`—2`. В результаті опору вугільного пласту стисненню швидкість руху фрагмента змінилася на dv.

Визначимо зміну кінетичної енергії маси фрагмента, що перемістився з положення 1—2 в нове положення 1`—2`. Зміна кінетичної енергії буде дорівнювати різниці кінетичних енергій мас об'ємів 1—2 і 1`—2`.

$$E_{K1-2} = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho\omega S v^2}{2}; \tag{6}$$

$$E_{K1'-2'} = \frac{m(v-dv)^2}{2} = \frac{\rho\omega S(v-dv)^2}{2}; \tag{7}$$

де m — маса переміщуваного тіла; v — швидкість тіла; ρ — густина води.

Перетворимо вираз (7):

$$E_{K1'-2'} = \frac{\rho\omega S(v-dv)^2}{2} = \frac{\rho\omega S v^2 - \left(2vdv - dv^2\right)}{2}. \tag{8}$$

Приймемо нескінченно малу величину $2vdv - dv^2$ у виразі (8) приблизно рівною нескінченно малій величині $2vdv$, тоді

$$E_{K1'-2'} = \frac{\rho\omega S(v-dv)^2}{2} \approx \frac{\rho\omega S(v^2 - 2vdv)}{2}. \tag{9}$$

Згідно теореми про кінетичну енергію, зміна кінетичної енергії на деякому проміжку шляху дорівнює повній роботі всіх сил на цьому шляху. Тоді

$$E_{K1-2} - E_{K1'-2'} = \sum A_{dh}. \tag{10}$$

де $\sum A_{dh}$ — повна робота всіх сил на шляху dh.

На фрагмент рідини, що переміщується у вугільному пластовому середовищі, із врахуванням припущень, діють такі основні сили: сила ваги, сила гідродинамічного тиску рідини і сила опору вугільного пласту стисненню. Отже, загальна робота цих сил

$$\sum A_{dh} = A_G + A_P - A_{\text{ОП}}. \tag{11}$$

Робота сили ваги G даного фрагменту рідини

$$A_G = \rho g w S dh, \tag{12}$$

де g — прискорення вільного падіння.

Швидкість руху фрагменту струменя рідини на початку ділянки dh дорівнює v, тоді сила гідродинамічного тиску рідини $F_p = \rho Q v$. Припустимо, що при проходженні нескінченно малої ділянки dh сила гідродинамічного тиску рідини залишилася незмінною і дорівнює F_p, тоді

$$A_P = \rho Q v dh, \tag{13}$$

де Q – витрата рідини.

Робота сили опору вугільного пласту при його стисненні

$$A_{\text{ОП}} = F_{\text{ОП}} dh = \tau w dh, \tag{14}$$

де $F_{\text{ОП}} = \tau w$ — сила опору вугільного пласту стисненню; τ — напруження, яка визначається твердістю вугільного пласту.

Підставимо вирази (6), (9), (12), (13), (14) в (10):

$$\frac{\rho\omega S v^2}{2} - \frac{\rho\omega S\left(v^2 - 2vdv\right)}{2} = \rho g\omega S dh + \rho Q v dh - \tau\omega dh. \tag{15}$$

Введемо коефіцієнт відносної втрати швидкості руху струменя рідини у вугільному пласті залежно від глибини проникнення, величина якого залежить від типу і властивостей вугільного пласту:

$$k_{Ш} = \frac{dv}{dh}. \tag{16}$$

Тоді

$$\rho\omega S v dv = (\rho g\omega S - \tau\omega) dh + \rho Q v \frac{dv}{k_{Ш}}. \tag{17}$$

Проінтегруємо обидві частини рівності (17) в околі області $R = \{(v_{max}; 0) – (0; h_{max})\}$. Межі інтегрування вибрані з таких міркувань — при вході струменя рідини в вугільний пласт струмінь має максимальну початкову швидкість v_{max}, при цьому глибина проникнення струменя в вугільний пласт дорівнює 0, через деякий проміжок часу швидкість вертикального переміщення струменя зменшується до 0, що відповідає максимальній глибині проникнення струменя рідини в вугільний пласт h_{max}.

В результаті цього, після деяких перетворень, отримаємо

$$h_{\max} = \frac{\left(\rho W - \frac{1}{k_{Ш}}\rho Q\right) v_{\max}^2}{2(\tau\omega - \rho g W)}. \tag{18}$$

Перетворимо вираз (18) з метою виявлення залежності глибини проникнення струменя рідини в вугільний пласт від величини тиску рідини в гідроімпульсній камері 5.

При закінченні виходу рідини під тиском із гідроімпульсної камери 5 через насадок її витрату визначаємо згідно з формулою [8]

$$Q = \mu\omega\sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \tag{19}$$

де μ — коефіцієнт витрати; p — тиск всередині гідроімпульсної камери.

Швидкість струменя на виході з насадка в при закінченні виходу рідини під тиском із гідроімпульсної камери 5 через насадок може бути визначена безпосередньо за формулою (4), або згідно з відомою формулою [8], виходячи із максимального тиску води при відкритті реле тиску 3 в кінці робочого ходу штока 9 у порожнині гідроімпульсної камери 5:

$$v = \varphi\sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \tag{20}$$

де φ — коефіцієнт швидкості.

Підставивши вирази (19) і (20) в (18) і провівши необхідні перетворення, отримаємо

$$h_{\max} = \frac{\left(W - \frac{\mu\varphi\omega}{k_{Ш}}\sqrt{\frac{2p}{\rho}}\right)^2 \rho}{\tau\omega - \rho g W}, \tag{21}$$

де W — об'єм рідини вноситься за один імпульс (об'єм робочої камери); μ — коефіцієнт витрати; w — площа поперечного перерізу струменя (площа вихідного отвору насадка); $k_{Ш}$ — коефіцієнт відносної втрати швидкості руху струменя рідини у вугільному пласті, залежний від

глибини проникнення; p — тиск рідини всередині гідроімпульсної камери; ρ — густина рідини; φ — коефіцієнт швидкості.

Таким чином, отримані вирази (18) і (21) дозволяють визначити максимальну глибину проникнення h_{max} високонапірного струменя води у вугільний пласт при її гідроімпульсному нагнітанні залежно від технологічних параметрів процесу нагнітання, технічних параметрів пристрою і фізичних властивостей вугільного пласту.

Висновки

Виведені узагальнені функціональні залежності, що зв'язують між собою основні параметри привідної гідросистеми і конструкції гідроприводного вузла поршневого насоса, придатні для практичних розрахунків при попередньому оцінюванні і, виборі їх параметрів на стадії ескізного проектування.

Показана актуальність подальшої розробки та вдосконалення технологічного обладнання для видобутку та утилізації вугільного метану, зокрема, установок для імпульсного нагнітання води у вугільний пласт, впровадження яких сприятиме інтенсифікації газовиділення вугільного метану.

Розглянуто конструктивне виконання нового устаткування, яке базується на застосуванні гідравлічного приводу, керування яким здійснюється за допомогою гідравлічного генератора імпульсів тиску — автоколивального двоступінчатого чотириходового золотника.

Запропоновано математичні залежності для визначення параметрів формування імпульсного струменя на виході нагнітального вузла і розглянуто процес проникнення імпульсного струменя води у вугільний пласт, які забезпечать визначення оптимальних режимів нагнітання рідини та ефективність імпульсної дії струменя на вугільний пласт.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Булат А. Ф. Перспективи та проблеми промислового видобування та утилізації метану вугільних родовищ // Вісник НАН України, — 2006, — № 7. — С.19—20.

2. Усачев П. М. Гидравлический разрыв пласта. — М.: Недра, 1986. — 186 с.

3. Минеев С. П. Вопросы эффективности гидроударного воздействия на горный массив // Разрушение горных пород при статическом и динамическом нагружении: Сб. науч. тр. / АН УССР. — Ин-т геотехн. механики. — Киев: Наукова думка, 1990. — С. 79—84.

4. Васильев Л. М., Полищук А. В., Родин А. В. О подходе к расчету параметров гидроциклического воздействия на угольный пласт через скважину // Разрушение горных пород при статическом и динамическом нагружении: Сб. науч. тр. / АН УССР. — Ин-т геотехн. механики. — Киев: Наукова думка, 1990. — С. 75—78.

5.А.с. 1273606, СССР, МКИ Е21F 5/02. Генератор ударных импульсов / И. В. Коц, А. Ф. Пономарчук, Г. С. Ратушняк. — № 3848930/22-03. — Заявлено 24.01.85 // Открытия. Изобретения. — 1986. — № 4.

6. Гидропривод сваепогружающих и грунтоуплотняющих машин / М. Е. Иванов, И. Б. Матвеев, Р. Д. Искович-Лотоцкий, В. А. Пишенин, И. В. Коц. — М.: Машиностроение, 1977. — 174 с.

7. Эрих Камке. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. — М.: Лань, 2003. — 643 с.

8. Константінов Ю. М., Гіжа О. О. Технічна механіка рідини і газу. — Київ: Вища школа, 2002. — 277 с.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом Всеукраїнської науково-технічної конференції «Альтернативні екологічно чисті та відновлювальні джерела енергії» (30.05—1.06.2007 р.)

Надійшла до редакції 30.06.07
Рекомендована до друку 02.07.07

Коц Іван Васильович — доцент кафедри теплогазопостачання.
Вінницький національний технічний університет;
Надутий Володимир Петрович — завідувач відділом.
Інститут геотехнічної механіки НАН України, м. Дніпропетровськ