

UDC 622.273:548.562

<https://doi.org/10.15407/mining11.02.052>

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗРОБКИ ГАЗОГІДРАТНИХ ПОКЛАДІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ СВЕРДЛОВИННОГО ГІДРОВИДОБУТКУ

М. Педченко^{1*}, Л. Педченко¹¹Кафедра видобування нафти і газу та геотехніки, Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Полтава, Україна*Відповідальний автор: e-mail pedchenkomm@ukr.net, тел. +380975905244

ANALYSIS OF GAS HYDRATE DEPOSITS DEVELOPMENT BY APPLYING ELEMENTS OF HYDRAULIC BOREHOLE MINING TECHNOLOGY

M. Pedchenko^{1*}, L. Pedchenko¹¹Department of Oil and Gas Exploitation and Geotechnics, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine*Corresponding author: e-mail pedchenkomm@ukr.net, tel. +380975905244

ABSTRACT

Purpose. To substantiate and develop the principal schematics suitable for the existing technological level and method of gas hydrates production from the offshore fields.

Methods. Analysis of properties inherent to gas hydrates and gas hydrate deposits and research into peculiarities of the technological operations of the hydraulic borehole mining.

Findings. Basic processes related to the method of gas hydrate extraction from the productive stratum without energy consumption for phase transition on the basis of the hydraulic borehole mining technology are substantiated.

Originality. The research provided rationale for manifestation of the group of factors involved in the process of immersed jets action on the gas hydrate in conditions of its natural occurrence. It was confirmed that gas hydrates can be extracted from the productive stratum without energy consumption for dissociation, by creating conditions for their recrystallization as a result of joint impact produced by immersed jets of sea water and a complex of related processes. Theoretical justification is given to the physical fundamentals of the processes associated with gas hydrates enrichment and concentration in the mine working.

Practical implications. Technology for the development of gas hydrate deposits on the basis of hydraulic borehole mining without energy consumption for the phase transition is proposed.

Keywords: hydraulic borehole mining, gas hydrate stratum, dissociation, concentration, phase transition

1. ВСТУП

Тенденція тривалого виснаження світових запасів традиційних видів палива актуалізувала для світового співтовариства проблему подальшого вивчення ресурсного потенціалу океанічних гідратів метану та їх застосування для отримання вуглеводневого газу. Сьогодні морські газогідрати визнані фахівцями найперспективнішим альтернативним паливом у багатьох країнах. Протягом останніх років інтерес до проблеми газових гідратів у всьому світі значно посилюється і їх дослідно-промислове освоєння уже розпочалося.

Газові гідрати, звичайно, не лежать суцільним килимом у межах зони гідратуутворення – відповідної температури і тиску недостатньо. Необхідний високий уміст органічної речовини в осадових породах (від 0.5 – 4.0% і вище), активна генерація й міграція

вуглеводнів у зону утворення гідрату. Однак за попередніми оцінками загальні об'єми метану, накопичені в природних гідратах Світового океану, оцінюються на рівні $2.1 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$ (Kvenvolden, 1993).

Величезні перспективні поклади газогідратів виявлені в межах полярних акваторій на глибинах вод від 200 м, у районах Атлантичного, Індійського та Тихого океанів – на глибинах від 500 – 700 м. Тільки в межах Мексиканської затоки виявлено більше 70 покладів газогідратів. В акваторії Австралії, в районі Нової Каледонії, сейсмічна розвідка виявила поклад газогідратів загальною площею більше 80 тис. км² на глибині води від 1 до 4 км. Запаси газу в стані гідратів тут можуть бути від 20 до 200 трлн м³.

Виходячи із відомих на сьогодні даних, підводні газові гідрати можуть утворювати скупчення двох типів: першого – знаходяться на значній піддонній глибині

(сотні метрів) і контролюються зонами проникності в умовах розосередженої фільтрації флюїдів; другого – розташовані в безпосередній близькості від дна моря, на дні або на дуже незначній піддонній глибині (перші метри) (Bondarenko, Sai, Ganushevych, & Ovchynnikov, 2015). Гідрати у своїй більшості присутні в грубозернистих осадових відкладах, проте під час виконання досліджень гідрати також виявлено і в дрібнозернистих відкладах у вигляді невеликих прошарків, лінз і тонких, майже вертикальних жил. Так, наприклад, при дослідженні свердловини NGHP-01-10 виявлено потужний інтервал тріщинуватих глин, уміст гідратів у яких є одним з найвищих у світі (Collett, 2014).

Найбільше в світі мономінеральне лінзовидне газогідратне тіло розкрито свердловиною №84 Проекту глибокого морського буріння. Маючи товщину близько 4–5 м, воно містить усього 5–7% породних включень і залягає в 15-метровому гідратоносному горизонті, підшва якого розташована 240–255 м нижче дна в центральноамериканському глибоководному жолобі біля Гватемали. З іншої свердловини, пробуреної в тому ж жолобі, але біля Коста-Ріки, піднятий 9-метровий керн вулканічного попелу, зцементованого гідратами. Пористість керну складає 62%, простір якої заповнений метаногідратами. Цей попіл залягає у 236-метровій товщі газогідрату, середня пористість якої 60.1% (Takahashi & Tsuji, 2004).

Існує два підходи до розробки газогідратних покладів (патенти US 4424866, WO 2007/136485, US 20050161217, US 6192691, US 8232438, US 8783364, US 20100048963, US 8201626, US 20080236820 та ін.):

1) вилучення гідрату без витрати енергії на фазовий перехід. Прикладом є різні варіанти кар'єрного способу. Однак на глибинах залягання гідрату рентабельне великотоннажне виробництво буде проблематичним;

2) вилучення вільного газу після дисоціації гідрату в пласті.

Плавлення газогідрату пропонується здійснювати наступними способами:

– зниженням тиску нижче за рівноважний гідратоутворення;

– підвищенням температури (нагрів гідратомісних порід до температури, вищої за рівноважну);

– зміщенням умов фазової рівноваги у бік більш жорстких (введенням інгібіторів);

– комбінуванням перелічених вище способів.

Нині відомо ряд теплових способів розробки газогідратних покладів. Так, у патенті US 6192691 пропонується під купол для збору газу, встановленим над придонним скупченням газогідрату, закачувати гарячу воду. У заявці US 20050161217 запропоновано здійснювати електричний підігрів продуктивного пласта та вилучати газ, що виділився, по видобувній свердловині. Проте недоліком теплових методів розробки газогідратних покладів є значні енергетичні витрати. Так, крім порівняно незначних енерговитрат на дисоціацію газогідрату (близько 7% від енергії згорання видобутого газу), значна їх частина піде на розігрів породи. Крім того, виходячи з теплофізичних властивостей порід і газогідрату, зона теплової дії в пласті буде обмежена кількома метрами.

З точки зору енергетичних витрат найбільш прийнятним є зниження пластового тиску нижче за рів-

новажний з подальшим відбором вільного газу. Наприклад, у заявці WO 2007/072172 зниження тиску забезпечується за рахунок відкачування газу з нижніх горизонтів. Проте такий спосіб є прийнятним лише для пластів, де насиченість гідратами незначна, а газ або вода не втратили свою рухливість. Звичайно, при збільшенні гідратонасичення (а отже, зменшенні проникності) ефективність такого способу різко падає.

Інший недолік цього способу пов'язаний із вторинним гідратоутворенням у привибійній зоні внаслідок ефекту Джоуля-Томсона та проявом ефекту самоконсервації гідрату в пласті. Процес ускладнюється ще й тим, що породи з умістом гідрату більше ніж 60% є фактично непроникними для газу (Basniev, Kul'chitskiy, Shchebetov, & Nifantov, 2006). У результаті газогідратний пласт на тривалий час “надійно консервується” шаром льоду.

Крім того, проникність по газу гідратонасичених порід на два, три і більше порядків нижча за проникність зразків, не насичених гідратами (Beznosikov & Maslov, 1975).

Газові гідрати також можуть виконувати функцію “цементу” для частинок породи. У такому випадку дисоціація гідрату призведе до аномально високої пористості, виділення великих мас води та істотного зниження міцності осадових порід (Kvenvolden, 1993). Тому плавлення газогідрату внаслідок зниження тиску, підвищення температури або введення інгібіторів може призвести до перетворення порід у перезволожену масу із включенням бульбашок газу. Створення депресії для вилучення газу призведе до винесення у свердловину разом із водою і газом значної кількості породи, унеможливаючи її експлуатацію.

Аналізуючи інформацію щодо початку практичної реалізації проекту розробки газогідратних покладів біля берегів Японії, можна зробити висновок, що саме цей процес призвів до завчасного припинення експерименту щодо отримання газу з газогідратного пласта способом його розгерметизації (було зафіксовано значний виніс породи зі свердловини і закупорювання нею сепараційного обладнання).

Способи, наведені в заявках US 2008/0088171, WO 00/47832 і RU 2004106857/03, передбачають кар'єрну розробку придонних газогідратних покладів шляхом їхнього механічного руйнування. Однак їх упровадження ускладнить той факт, що поверхня зон розвантаження газу, до яких приурочені придонні поклади газогідрату, переважно вкрита шаром відкладів (часто вони зустрічаються, починаючи з глибини 0.4–2.2 м (Shnyukov, Gozhik, Krayushkin, & Klochko, 2007)). Крім того, такі методи будуть ефективними лише за умови значного вмісту газогідрату в породі.

На сьогодні не існує ефективного, з технологічної й економічної точок зору, способу розробки покладів газових гідратів. Розроблення промислово прийнятнього способу видобування газу із морських газогідратних покладів вимагає максимального зниження енерговитрат на його здійснення на основі комплексного врахування теплофізичних властивостей і параметрів елементів системи в межах покладу, що розробляється, та існуючого рівня техніки. На сучасному етапі ця проблема досліджена недостатньо.

2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Метою дослідження є обґрунтування перспектив застосування, аналіз і удосконалення комбінованого способу розробки морських газогідратних покладів на основі технології свердловинного гідровидобутку.

У гірництві добре відома фізико-хімічна технологія свердловинного гідровидобутку (СГВ) корисних копалин, в якій гідравлічна енергія, що підводиться до покладу після розкриття його свердловиною, використовується для розшлющення породи в місці її залягання шляхом переведення в рухомий стан за допомогою гідромоніторного струменя, приготування гідросуміші (пульпи) і вилучення її на поверхню (Arens et al., 2007).

Механізм гідравлічного руйнування гірських порід є складним процесом, обумовленим одночасною дією ряду чинників, до яких можна віднести нормальне і дотичне напруження при дії струменя на масив, динамічну ударну дію, фільтраційний тиск, абразивну дію і т.д. (Rehbinder, 1980).

Проникаючи в масив за рахунок фільтрації по порках і тріщинах, вода знижує міцність порід (Rehbinder, 1980), викликає місцеві гідророзриви і руйнування, що необхідно враховувати при вивченні механізму подрібнення конкретного масиву введенням відповідних коефіцієнтів, корегуючи наведену залежність. Однак у процесі руху струменів у багатофазних системах (вода, тверді включення, газ) виникають явища настільки складні, що на сьогодні не існує достатньо надійних способів їх аналітичного визначення.

Також не знайдена загальна аналітична залежність сили дії струменя на перешкоду. Тому найбільш точні дані можна отримати при проведенні подальших експериментальних досліджень.

Технологічні процеси свердловинного гідровидобутку тісно взаємозв'язані між собою і у своїй сукупності являють рішення складної задачі – поєднання різноструктурних процесів в єдиний технологічний цикл видобутку корисних копалин через свердловини з урахуванням різних гірничо-геологічних вимог до процесу гідровидобутку.

Гідродинамічна дія на межі “порода – флюїд” супроводжується процесами масовиддачі, які характеризують швидкість гідровидобутку. При гідродинамічній дії на газогідрат у продуктивному пласті, окрім його гідродинамічного і механічного руйнування, відбуваються (можуть відбуватися) фізико-хімічні процеси його дисоціації і перекристалізації.

Коефіцієнт масовиддачі при цьому визначає загальну величину переміщення міжфазної межі углиб масиву за одиницю часу при прояві різних механізмів перенесення маси за різних умов контакту фаз (молекулярна дифузія, конвективне перенесення, перенесення при дії на поверхню породи самоорганізованих гідродинамічних вихрових структур, перенесення при розчиненні частини газу і солей у воді, що подається гідромонітором).

Гідроабразивний ефект. На зрізі насадки гідромонітора витрата струменя рівна подачі насосів. У міру віддалення від насадки витрата струменя збільшується за рахунок приєднаної маси рідини ззовні. Таке можливе тільки в тому випадку, якщо основна

маса рідини знаходиться в постійній циркуляції, багато разів виходячи зі струменя і повертаючись у струмінь, наприклад після удару об забій. Встановлено, що перед зустріччю із забоем витрата струменя більш ніж у 4 рази перевищує початкову витрату.

Однак маса води, що приєднується до струменя ззовні, у своєму складі неодмінно буде містити якусь частину твердих включень подрібненої породи і газогідрату. Внаслідок цього гірський масив буде додатково піддаватись абразивній дії твердої фази.

Як відомо, гідроабразивне руйнування гірських порід ґрунтується на безперервній сумісній дії високошвидкісних струменів води й абразивних частинок. У результаті такої дії в породі утворюється щілина певної глибини і ширини. Причому глибина щілини в цьому випадку у 5 – 8 разів перевищує глибину щілини, утвореної струменями води без додавання абразивного компонента.

Дисипація енергії. Потенційна енергія води в насадці перетвориться в кінетичну. Сила дії затопленого струменя гідромонітора у міру її розповсюдження в масі навколишньої рідини інтенсивно знижується (Helgerud, 2001). Тому визначальним параметром у фізичному механізмі передачі енергії від струменя до породи є відстань від сопла до породи.

Вода біля дна океанів і глибоких морів має температуру не вище 1 – 4°C, і тиск від 10 до 50 МПа. Формування за таких умов гідрату метану впливає на його енергощільність (теплотворну здатність, теплоємність), яка складає 747458 ккал/м³, що в 73 рази більше енергощільності газоподібного метану (Lowrie & Max, 1999).

Відомо, що досить значними є втрати енергії потоку гідромоніторного струменя у результаті її дисипації. Ці втрати суттєво впливають на ККД процесу гідравлічного руйнування породи. Однак при видобуванні способом свердловинного гідровидобутку газових гідратів передбачається, що дисипація енергії струменя навпаки буде позитивно впливати на ефективність процесу дезінтеграції продуктивного пласта.

Окрім підвищення температури робочої рідини (води) у результаті дисипації енергії в насосах і трубопроводній системі, частина енергії перетвориться на тепло у момент удару струменя об породу. На межі руйнування утвориться аномальна зона розігріву. Однак ця зона буде досить локальною (передбачається, що вона буде обмежена шаром породи у кілька міліметрів і діаметром порядку десятків метра).

Як впливає із Рисунок 1, поклади газових гідратів накопичуються в інтервалі 8 між верхньою і нижньою межею їх стабільності (лінії 2 і 9). Ці межі проходять через точки перетину кривих геотермічного градієнта (крива 5) і рівноважних параметрів стабільності гідрату даного складу (крива 3). Газовий гідрат у покладі знаходиться при певному рівні переохолодження (інтервал 6), максимум якого знаходиться у верхній частині інтервалу гідратонакопичення (інтервал 8).

Застосування теплових методів видобування газових гідратів передбачає спочатку витрату енергії на підвищення температури продуктивного пласта до рівноважної для відповідного тиску (на величину переохолодження), а потім на їх плавлення. Цей процес (можливо частково або фрагментарно) буде відбуватись і в локальних зонах розігріву фронту руйнування.

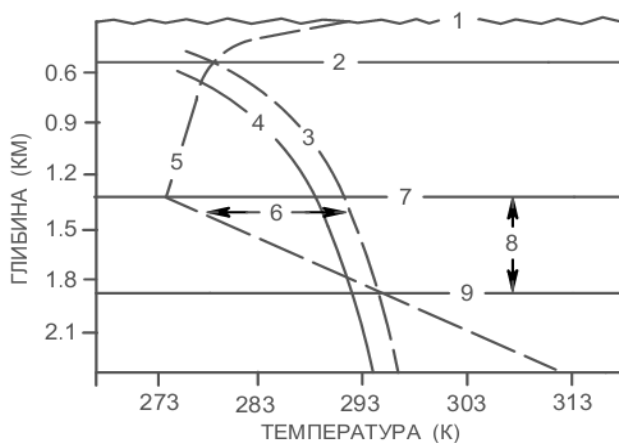


Рисунок 1. Схема зони можливого утворення газогідратних покладів: 1 – рівень моря; 2 – верхня межа стабільності газогідрату; 3 – рівноважна крива стабільності газогідрату; 4 – рівноважна крива стабільності газогідрату з урахуванням впливу солей морської води; 5 – геотермічний градієнт; 6 – рівень переохолодження газогідрату в пластових умовах; 7 – дно моря; 8 – інтервал можливого гідратонакопичення; 9 – нижня межа стабільності газогідрату

Виходячи із кількості привнесеної в таку зону теплової енергії можливі варіанти зменшення рівня переохолодження гідрату, позитивним наслідком якого буде різке зменшення його механічної міцності (Helgerud, 2001), або дисоціації якоїсь частини гідрату з виділення газової фази і води.

Однак за межами цієї зони, відповідно до закону збереження енергії, після теплообміну продуктів руйнування породи з водогідратомінеральною пульпою спостерігатиметься зворотний процес – зв’язування вільного газу в гідрат і подальше його переохолодження відповідно до теплового балансу системи.

Таким чином, перетворення частини енергії струменя у теплову у випадку розробки газогідратних покладів не просто не знизить ефективність процесу гідровидобутку, а, можливо, викличе синергетичний ефект сумісної дії кількох чинників. Виходячи з цього, доцільно буде передбачити можливість цілеспрямованого привнесення додаткової теплової енергії в зону руйнування породи.

Вплив морської води. Урахування потребує ще один чинник, який у випадку свердловинного гідровидобутку газових гідратів створить суттєвий позитивний вплив на ефективність процесу, – це морська вода як робоча породоруйнівна рідина. По-перше, в тепловому балансі процесу необхідно врахувати відмінність температури води у місці її забору (поблизу морського дна) і продуктивного пласта (Рис. 1). По-друге, необхідно врахувати позитивний вплив розчинених у морській воді солей – інгібіторів гідратоутворення, які змістять рівноважні умови стабільності газогідрату у бік більш жорстких (крива 4 на Рис. 1).

Таким чином, при застосуванні елементів технології свердловинного гідровидобутку для розробки газогідратних покладів ефективність “класичних” процесів руйнування породи високонапірним струменем води може значно зрости внаслідок зміщення

рівноважних параметрів стабільності газогідрату під впливом солей морської води, теплової енергії морської води (якщо її температура буде вища за пластову) і дисипації частини енергії високонапірного струменя. Завдяки цьому на межі масиву і вироблення, як мінімум, знизиться міцність газогідрату або відбуватиметься дисоціація його частини. Виділення газової фази призведе до утворення локальних зон підвищеного тиску в тонкому шарі біля вільної поверхні. Руйнування цього шару з середини і викидання уламків породи й бульбашок газу у бік виробленого простору поряд з дією інших чинників значно підсилить процес дезінтеграції породи.

Беручи до уваги описаний вище процес і те, що газогідрат у шарі осадової породи може виконувати функції її скелета, можна припустити, що швидкість гідралічного руйнування породи із газогідратом буде значно вищою порівняно з породою без газогідрату. Такий процес масовіддачі можна розглядати як комбіноване газодинамічне явище.

Фазова рівновага. Виходячи із параметрів морської води, рівня дисипації енергії високонапірного потоку й ентальпії дисоціації гідрату метану, виділення газу в зоні руйнування породи буде незначним. На деякій відстані за зоною руйнування прагнення системи до рівноваги стимулюватиме зворотний процес – гідратоутворення (віддалившись від фронту руйнування продукти дисоціації, – газ і вода знову потраплять у зону термобаричних параметрів гідратоутворення), а отже, гідралічне руйнування буде супроводжуватись перекристалізацією якоїсь частини газогідрату.

Крім того, виходячи із властивостей газових гідратів, об’єм газової шапки в склепінні герметизованої виробки не буде збільшуватись вище певного рівня оскільки після підвищення тиску до рівноважного гідратоутворення всі наступні порції газу будуть швидко зв’язані в гідрат (усі необхідні передумови для цього (баланс енергії, площа контакту фаз, наявність у надлишку води) виконуватимуться).

Перекристалізація і збагачення. Виходячи зі щільності компонентів утвореної у виробці суміші, на деякій відстані за зоною руйнування (починаючи з відстані, де вплив турбулентного перемішування буде незначним) за рахунок гравітаційного розділення відбуватиметься випадіння в осад породних включень, а частинки газогідрату (природного і перекристалізованого) й бульбашки газу із зони дисоціації рухатимуться до склепінної частини виробки.

Як відомо, газові гідрати являють собою каркас “господаря” із молекул води і молекул гідратоутворюючого газу. Така їх будова проявляється у властивості витіснення із гідратного каркаса будь-яких домішок (у тому числі і іонів розчинених солей) та найшла своє застосування, наприклад, у технологіях газогідратного опріснення води й концентрування розчинів.

Хоча, як показали експерименти, на макрорівні при інтенсивному гідратоутворенні можливе захоплення між кристалами гідрату краплин води і рідких вуглеводнів, а також твердих породних включень. Проте експерименти також показали, що при утворенні гідрату за умов, близьких до рівноважних, і при

надлишку води в реакторі (аналогічно до ситуації, котра, як передбачається, буде спостерігатись у виробці) адгезії гідрату до елементів обладнання не спостерігалось. Тому можна прогнозувати, що, “відокремившись” від частинок породи у результаті дисоціації в зоні руйнування та перекристалізувавшись в іншому місці (оскільки процеси дисоціації і гідратування будуть рознесені просторово), гідрат буде містити мінімальну кількість мінеральних включень.

Отже, в процесі масовіддачі від гідратонасиченого пласта відділятиметься газогідрат, порода і газ. Залежно від стратифікації пульпи, що утворилася, важкі частинки породи спускатимуться на дно виробки, а більш легкі (газогідрат, агломерат газогідрату і породи у різному співвідношенні, бульбашки газу) спливатимуть до її кривлі. Таким чином, ще у виробці буде відбуватись процес первинного (або основного) збагачення утвореної пульпи по цільовому продукту.

Зважаючи на те, що щільність гідрату метану дещо нижча щільності води, частина мінеральних включень відділиться в осад, але інша частина відділеного від масиву гідрату все ж буде зв'язана з породою. Виходячи із попередніх розрахунків, щільність водогідратомінеральної пульпи, яка вилучатиметься із виробки, лежатиме в межах 1050 – 1150 кг/м³.

Ураховуючи наведене вище обґрунтування, параметри зон гідратонакопичення, а також теплофізичні властивості газових гідратів, пропонується спосіб розробки газогідратних покладів на основі технології свердловинного гідровидобутку. Його особливістю є те, що із покладу пропонується вилучати безпосередньо газогідрат, не витрачаючи енергії на його дисоціацію.

Технологічний процес розробки газогідратних покладів згідно з цим способом (Рис. 2) включає наступні операції:

1) розкриття гідратовмісного пласта свердловиною 7 на максимальну протяжність горизонтальними, а потужних пластів – вертикальними або похило спрямованими до їх підшови свердловинами;

2) вплив на продуктивний пласт (починаючи від вибою свердловини) з метою його дезінтеграції при частковій дисоціації та перекристалізації газогідрату (внаслідок утворення на короткий час локальних зон із нерівноважними умовами) в результаті дії затоплених струменів високого тиску (потік VI) за допомогою гідромонітора 6. Причому для збільшення об'єму виробки штанги з насадками гідромонітора в робочому положенні подовжуються, займають перпендикулярне до осі свердловини положення та, обертаючись навколо неї, рухаються вздовж до контакту з фронтом дезінтеграції;

3) гравітаційне відділення від утвореної водогідратомінеральної пульпи 2 на деякій відстані за активною робочою зоною частини мінеральних включень породи 3 відповідної щільності й фракційного складу;

4) виведення попередньо збагаченої водогідратомінеральної пульпи із виробки (потік I) через пульпозабірник 5, розташований за активною робочою зоною, до сепаратора 9, розташованого на рівні морського дна;

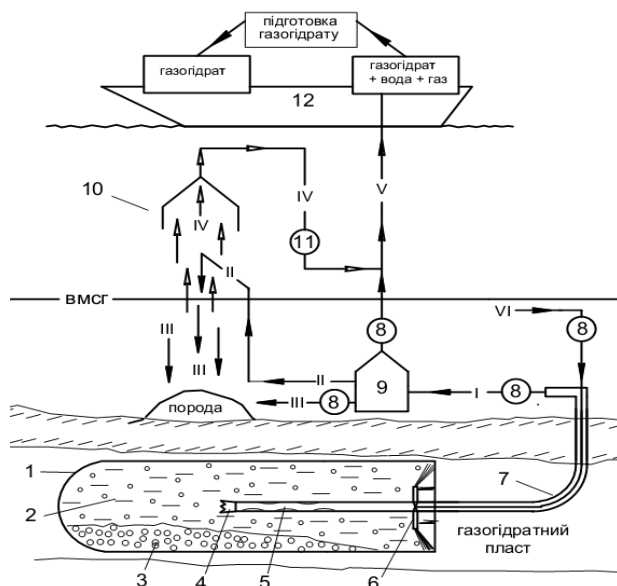


Рисунок 2. Схема способу розробки морських газогідратних покладів: ВМСГ – верхня межа стабільності газогідрату; 1 – виробка у гідратонасиченому пласті; 2 – простір у виробці, заповнений водогідратомінеральною пульпою; 3 – осад породи; 4 – бурове долото; 5 – пульпозабірник; 6 – гідромоніторний пристрій; 7 – свердловина; 8 – насос; 9 – гравітаційний сепаратор; 10 – газозбірний купол; 11 – компресор; 12 – видобувна платформа; потоки: I – водогідратомінеральна пульпа; II – пульпа, збіднена на газогідрат; III – “пуста” порода; IV – газ, що виділився із пульпи в результаті дисоціації газогідрату; V – водогазогідратна пульпа; VI – морська вода

5) відділення від водогідратомінеральної пульпи (потік I) (під тиском, вищим за рівноважний гідратування) у гравітаційному сепараторі 9 “пустої” породи, яка відкачується насосом 8 на морське дно або через іншу свердловину – у відпрацьовану виробку (потік III), та у вигляді фракції, що спливає, – суміші води і газогідрату (потік V);

6) подачу насосом 8 водогазогідратної пульпи (потік V) на видобувну платформу;

7) відкачування збідненої пульпи (потік II) під газозбірний купол 10 у море по трубі, відкритий кінець якої розташований вище верхньої межі стабільності газогідрату (ВМСГ). При цьому у результаті перебування деякий час у нерівноважних умовах та теплообміну з морською водою у збідненій пульпі відбувається дисоціація решти газогідрату на газ і воду;

8) осідання уламків породи на морське дно (потік III), накопичення газу під газозбірним куполом 10, його стиснення компресором 11 та подачу до суміші води і газогідрату (потік V) для зв'язування у газогідрат.

З метою підвищення ефективності процесу пропонується накопичений під газозбірником газ після компримування подавати в нижню частину шлейфа і змішувати з водогазогідратною пульпою. Термобаричні умови в шлейфі відповідатимуть умовам стабільності газогідрату. Поданий газ буде зв'язаний у газогідрат.

На видобувній платформі вилучений газогідрат буде піддаватись підготовці та переробці (відповідно до технології, запропонованої в роботі (Pedchenko & Pedchenko, 2012) для подальшого його зберігання (Pedchenko & Pedchenko, 2015) й транспортування (Pedchenko & Pedchenko, 2016).

Оскільки, як зазначено в роботі (Kanda, 2006), устаткування для утворення газогідратів не потребує особливо унікального обладнання на відміну, наприклад, від заводів зрідження природного газу (LNG), це значно здешевлює NGH-технологію (транспортування газу у газогідратному стані). Крім того, потужність ліній із виробництва газогідрату може бути в 4 рази меншою порівняно з лінією виробництва LNG, без підвищення його собівартості (Gudmundsson, Parlactuna, & Khokhar, 1994).

Таким чином, запропонований спосіб розробки газогідратних покладів передбачає наступні етапи:

- 1) руйнування гідратомісної породи та її переведення в склад пульпи;
- 2) попереднє збагачення водогідратомінеральної пульпи у виробці в результаті осідання частини породи;
- 3) відділення від пульпи вільного газогідрату в гравітаційному сепараторі, розташованому на морському дні;
- 4) виділення зі збідненої пульпи газу у результаті дисоціації залишку газогідрату при її проходженні через товщу морської води в інтервалі вище верхньої межі стабільності газогідрату;
- 5) зв'язування газу, що виділився, у склад гідрату.

3. ВИСНОВКИ

1. Аналіз процесів свердловинного гідровидобутку, технологічних операцій і послідовності їх здійснення показав перспективність упровадження такого способу для розробки покладів газових гідратів.

2. Основна ідея запропонованого за результатами аналізу СГВ способу розробки газогідратних покладів полягає у вилученні максимальної кількості газогідрату із продуктивного пласта без витрати енергії на фазовий перехід, а дисоціація його залишку, враховуючи фізичні властивості, здійснюється за рахунок низькопотенційної енергії морської води та зміни її тиску з глибиною.

3. Відпрацювання запропонованого способу розробки покладів газових гідратів потребує проведення низки експериментальних досліджень.

ВДЯЧНІСТЬ

Дана робота стала можливою завдяки фінансовій та організаційній підтримці в межах державних бюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України “Застосування газогідратних технологій при розробці традиційних і газогідратних родовищ газу” (№ держреєстрації 0113U00857) та “Дослідження впливу термодинамічних параметрів фазових переходів у системах із газовими гідратами на ефективність газогідратних технологій” (№ держреєстрації 0115U002420).

Автори роботи висловлюють свою подяку керівнику даних проектів – доктору технічних наук, професору, завідувачу кафедри підземної розробки родовищ Національного гірничого університету (м. Дніпро) Бондаренку Володимирі Іллічу за підтримку у проведенні досліджень.

REFERENCES

- Arens, V., Babichev, A., Bashkatov, A., Gridin, O., Khrulev, A., & Khchevan, G. (2007). *Borehole Hydro-Mining*. Proc. Manual: Mining Book.
- Basniev, K., Kul'chitskiy, V., Shchebetov, A., & Nifantov, A. (2006). Methods for the Development of Gas Hydrate Deposits. *Gas Industry*, (7), 22-24.
- Beznosikov, A., & Maslov, V. (1975). Influence of Water Ice Hydrates in the Reservoir on its Permeability. In *Proceedings VNIIEGazproma*, (8), (pp. 84-89). Moscow: Gazprom.
- Bondarenko, V., Sai, K., Ganushevych, K., & Ovchynnikov, M. (2015). The Results of Gas Hydrates Process Research in Porous Media. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 123-127.
<https://doi.org/10.1201/b19901-23>
- Collett, T.S. (2014). Geologic Implications of Gas Hydrates in the Offshore of India: Results of the National Gas Hydrate Program Expedition 01. *Marine and Petroleum Geology*, (58), 1-2.
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.07.020>
- Gudmundsson, J.-S., Parlactuna, M., & Khokhar, A.A. (1994). Storage of Natural Gas as Frozen Hydrate. *SPE Production & Facilities*, 9(1), 69-73.
<https://doi.org/10.2118/24924-pa>
- Kanda, H. (2006). Economic Study on Natural Gas Transportation with Natural Gas Hydrate (NGH) Pellets. In *23rd World Gas Conference* (pp. 1-1). Amsterdam.
- Kvenvolden, K.A. (1993). Gas hydrates – Geological Perspective and Global Change. *Reviews of Geophysics*, 31(2), 173-187.
<https://doi.org/10.1029/93rg00268>
- Lowrie, A., & Max, M.D. (1999) The Extraordinary Promise and Challenge of Gas Hydrates. *World Oil*, 220(9), 49-55.
- Pedchenko, L., & Pedchenko, M. (2012). Substantiation of Method of Formation of Ice Hydrate Blocks with the Purpose of Transporting and Storage of Hydrate Gas. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 28-34.
- Pedchenko, L., & Pedchenko, M. (2015). Elements of the Technology of Storage Gases in the Gas Hydrate Form. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 509-516.
<https://doi.org/10.1201/b19901-87>
- Pedchenko, M., & Pedchenko, L. (2016). Technological Complex for Production, Transportation and Storage of Gas from the Offshore Gas and Gas Hydrates Fields. *Mining of Mineral Deposits*, 10(3), 20-30.
<https://doi.org/10.15407/mining10.03.020>
- Rehbinder, G. (1980). A Theory about Cutting Rock with Water Jet. *Rock Mechanics*, 12(3-4), 247-257.
<https://doi.org/10.1007/bf01251028>
- Shnyukov, E., Gozhik, P., Krayushkin, V., & Klochko, V. (2007). On the Eve of the World of Submarine Methane Hydrate Extraction. *Reports of National Academy of Sciences of Ukraine*, (6), 125-134.
- Takahashi, H., & Tsuji, Y. (2004) Japan Explores for Hydrate in the Nankai Trough. *Oil and Gas Journal*, (33), 48.
- Helgerud, M.B. (2001). *Wave Speeds in Gas Hydrate and Sediments Containing Gas Hydrate: A Laboratory and Modeling Study*. Ph.D. Stanford University.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Обґрунтування і розроблення принципової схеми, прийнятної для існуючого рівня техніки, способу видобування газових гідратів морських родовищ.

Методика. Аналіз властивостей газових гідратів та газогідратних покладів, а також особливостей протікання технологічних операцій свердловинного гідровидобутку.

Результати. Обґрунтовано основні процеси способу вилучення газогідрату із продуктивного пласта без витрати енергії на фазовий перехід на основі технології свердловинного гідровидобутку.

Наукова новизна. Встановлено та обґрунтовано прояв комплексу чинників у процесі дії затоплених струменів на газогідрат в умовах його природного залягання. Обґрунтовано можливість вилучення газогідрату із продуктивного пласта без витрати енергії на дисоціацію шляхом створення умов його перекристалізації у результаті сумісної дії затоплених струменів морської води і комплексу супутніх процесів. Теоретично обґрунтовано фізичні основи процесів збагачення і концентрування газових гідратів у гірничій виробці.

Практична значимість. Запропоновано технологію розробки газогідратних покладів на основі свердловинного гідровидобутку без витрати енергії на фазовий перехід.

Ключові слова: *свердловинний гідровидобуток, газогідратний пласт, дисоціація, збагачення, фазовий перехід*

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Обоснование и разработка принципиальной схемы, приемлемой для существующего уровня техники, способа добычи газовых гидратов морских месторождений.

Методика. Анализ свойств газовых гидратов и газогидратных залежей, а также особенностей протекания технологических операций скважинной гидродобычи.

Результаты. Обоснованы основные процессы способа извлечения газогидрата из продуктивного пласта без затрат энергии на фазовый переход на основе технологии скважинной гидродобычи.

Научная новизна. Установлено и обосновано проявление комплекса факторов в процессе действия затопленных струй на газогидрат в условиях его естественного залегания. Обоснована возможность извлечения газогидрата из продуктивного пласта без затрат энергии на диссоциацию путем создания условий его перекристаллизации в результате совместного действия затопленных струй морской воды и комплекса сопутствующих процессов. Теоретически обоснованы физические основы процессов обогащения и концентрирования газовых гидратов в горной выработке.

Практическая значимость. Предложена технология разработки газогидратных залежей на основе скважинной гидродобычи без затрат энергии на фазовый переход.

Ключевые слова: *скважинная гидродобыча, газогидратный пласт, диссоциация, обогащение, фазовый переход*

ARTICLE INFO

Received: 20 January 2017

Accepted: 30 May 2017

Available online: 30 June 2017

ABOUT AUTHORS

Mykhailo Pedchenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Exploitation and Geotechnics, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 24 Pershotravnevyi Ave., 1/110, 36011, Poltava, Ukraine. E-mail: pedchenkomm@ukr.net

Larysa Pedchenko, Candidate of Technical Sciences, Senior Instructor of the Department of Oil and Gas Exploitation and Geotechnics, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, 24 Pershotravnevyi Ave., 1/110, 36011, Poltava, Ukraine. E-mail: larysa.pedchenko@gmail.com