



УДК 622.273:548.562

FEATURES OF BOREHOLE HYDRAULIC MINING TECHNOLOGY APPLIED TO THE DEVELOPMENT OF GAS HYDRATE RESERVOIRS

L. Pedchenko^{1*} & N. Pedchenko²

¹ Department extract the oil and gas and geotechnics, National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

² Physics- power engineering faculty, V.N. Karazin Kharkiv National University

*Corresponding author: e-mail pedchenkomm@ukr.net, tel. 0975905244

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ГАЗОГІДРАТНИХ ПОКЛАДІВ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ СВЕРДЛОВИННОГО ГІДРОВИДОБУТКУ

Л. Педченко^{1*}, Н. Педченко²

¹ Кафедра видобування нафти і газу та геотехніки, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Україна

² Фізико-енергетичний факультет, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

*Відповідальний автор: e-mail pedchenkomm@ukr.net, тел. 0975905244

ABSTRACT

Purpose. Technology development of gas hydrate deposits on the basis of borehole hydraulic extraction without the cost of energy for the phase transition is proposed. Substantiation and development of schematics acceptable for the existing technological method of gas hydrates production from the offshore fields.

Methods. Method of extraction of gas hydrate from the productive layers.

Findings. Basic processes of the method of extraction of gas hydrate from the productive layers without energy consumption for phase transition at the base of the hydraulic downhole mining technology are substantiated.

Originality. It was established and substantiated manifestation of the complex factors in the process of action flooded jets on gas hydrates in terms of its natural occurrence.

Practical implications. It was substantiated that gas hydrates can be extracted from the productive reservoir without energy consumption for dissociation, by creating conditions of its recrystallization as a result of joint actions of submerged jets of sea water and complex of related processes. Theoretically physical bases of processes the enrichment and concentration of gas hydrates in the mine workings is substantiated.

Keywords: downhole hydraulic production, gas hydrate layer, dissociation, concentration, phase transition.

1. ВСТУП

Світове споживання природного газу постійно зростає. Не зважаючи на певні проблеми при його зберіганні (необхідність будівництва підземних сховищ газу) і транспортуванні (для переміщення морем на значні відстані газ скраплюється) споживання природного газу з технічної точки зору є найбільш зручним і надійним.

Однак легкодоступні запаси природного газу стрімко вичерпуються. При цьому близько 80 % родовищ газу, що відкриваються останнім часом, є відносно малими або віддаленими від транспортної інфраструктури. Крім того існуючі технології розробки родовищ вуглеводнів часто є малоефективними або не сприяють раціональному

використанню значної частини їх ресурсів (наприклад попутного нафтового газу, шахтного метану і ін.) чи взагалі їх поки не впроваджено (наприклад видобування газових гідратів).

У той же час тенденція тривалого виснаження запасів традиційних видів палива актуалізувала для світового співтовариства питання 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 гідратоутворення – відповідної температури і тиску недостатньо. Необхідний високий уміст органічної речовини в осадових породах (від 0,5 – 4% і вище), активна генерація і міграція вуглеводнів у зону утворення гідрату. Однак за попередніми оцінками загальні об'єми метану, накопичені в природних гідратах Світового океану, оцінюються на рівні $2,1 \times 10^{16} \text{ м}^3$ (Kvenvolden, 1993).

Величезні перспективні поклади газогідратів виявлені в межах полярних акваторій на глибинах вод від 200 м, у районах Атлантичного, Індійського і 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. км^2 на глибині води від 1 до 4 км. Запаси газу в стані гідратів тут можуть бути від 20 до 200 трлн м^3 .

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). 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, ліній 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, підосва 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 в 236-метровій товщі газогідрату, середня пористість якої 60,1% (Takahashi H. & Tsuji Y., 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 і 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 гідратовмісних 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 рівноважний 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, унеможлививши 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, Krayush-kin, & 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 прийнятного 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 розушільнення 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 порах 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 масовіддачі, 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 масовіддачі при цьому визначає загальну величину переміщення міжфазної межі углуб 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. Установлено, 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 M. B., 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 274 – 277 К, і тиск від 10 до 50 МПа. Формування за таких умов гідрату метану впливає на його енергетичну щільність (теплотвірну здатність, теплоємність), яка складає 747458 ккал/м³, що в 73 рази перевищує енергощільність газоподібного метану (Lowrie A. & Max M.D., 1999).

Відомо, що досить значними є втрати енергії потоку гідромоніторного струменя у результаті її дисипації. Ці втрати суттєво впливають на ККД процесу гідралічного 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 трубопровідній 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 десятих метра).

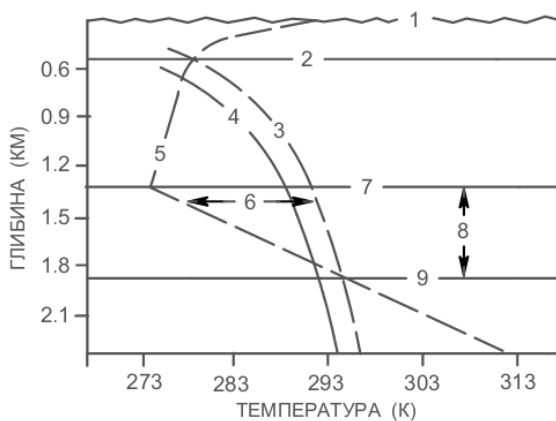


Рисунок 1. Схема зони можливого утворення газогідратних покладів: 1 – рівень моря; 2 – верхня межа стабільності газогідрату; 3 – рівноважна крива стабільності газогідрату; 4 – рівноважна крива стабільності газогідрату з урахуванням впливу солей морської води; 5 – геотермічний градієнт; 6 – рівень переохолодження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

Як впливає із рисунка 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.

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 M.B., 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 підсилять 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 із 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 і 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 гідратоутворення 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.

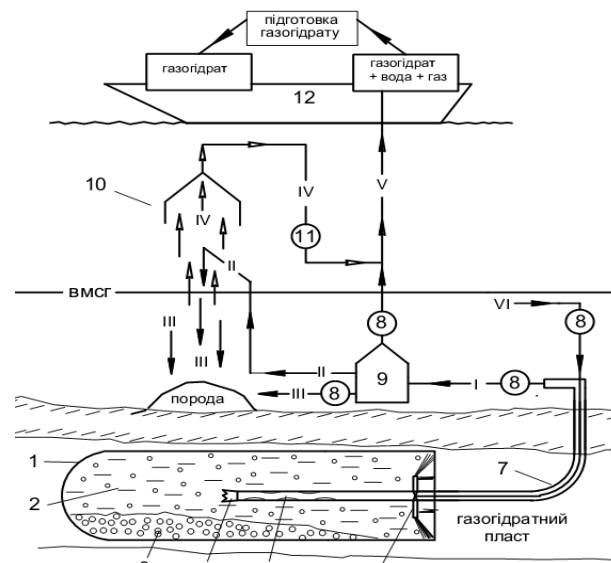


Рисунок 2. Схема способу розробки морських газогідратних покладів: ВМСГ – верхня межа стабільності газогідрату; 1 – виробка у гідратонасиченому пласті; 2 – простір у виробці, заповнений водогідратомінеральною пульпою; 3 – осад породи; 4 – бурове долото; 5 – пульпозбірник; 6 – гідромоніторний пристрій; 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

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 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 підшов свердловинами;

2) вплив на продуктивний пласт (починаючи від вибою свердловини) з метою його дезінтеграції при

частковий 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 і 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;

5) відділення від водогідратомінеральної пульпи (потік I) (під тиском, вищим за рівноважний гідратуутворення) 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 (ВМСТ). 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 і переробці (відповідно до технології, запропонованої в роботі (Pedchenko L. & Pedchenko M., 2012) для подальшого його транспортування (Pedchenko, M., & Pedchenko, L., 2016) й зберігання (Pedchenko, L., & Pedchenko, M., 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 гідратовмісної породи та її переведення в склад пульпи;

2) попереднє збагачення водогідратомінеральної пульпи у виробці у результаті осідання частини породи;

3) відділення від пульпи вільного газогідрату в гравітаційному сепараторі, розташованому на морському дні;

4) виділення із 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.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Arens, V., Babichev, A., Bashkatov, A., Gridin, O., Khrulev, A., & Khchevan, G. (2007). Borehole Hydro-Mining. Proc. Manual: Mining Book.
2. Basniev, K., Kul'chitskiy, V., Shchebetov, A., & Nifantov, A. (2006). Methods for the Development of Gas Hydrate Deposits. Gas industry, (7), 22-24.
3. Beznosikov, A., & Maslov, V. (1975). Influence of Water Ice Hydrates in the Reservoir on its Permeability. In Proceed-ings VNIIEGazproma, (8), (pp. 84-89). Moscow: Gazprom.
4. 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(A), 1-2.
5. Geologic implications of gas hydrates in the offshore of India: Results of the National Gas Hydrate Program Expedition 01 / Marine and Petroleum Geology 58 (2014) 1e2. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.07.020>
6. Gudmundsson, J.-S., Parlaktuna, M., & Khokhar, A.A. (1994). Storage of Natural Gas as Frozen Hydrate. SPE Production & Facilities, 9(1), 69-73. <http://dx.doi.org/10.2118/24924-pa>

7. Kanda, H. (2006). Economic Study on Natural Gas Transportation with Natural Gas Hydrate (NGH) Pellets. 23rd World Gas Conference, Amsterdam. <http://members.igu.org/html/wgc2006/pdf/paper/add10399.pdf>.
8. Kvenvolden, K. (1993). Gas Hydrates – Geological Perspectives and Global Change. *Rev. Geophysics*. 31. 173-187.
9. The Recycling of Biogenic Material at the Seafloor W. R. Martin and F. L. Sayles Woods Hole Oceanographic Institution, MA, USA / The Recycling of Biogenic Material at the Seafloor. <http://eesc.ldeo.columbia.edu/courses/w4937/Readings/Kvenvolden.1993.pdf>
10. Lowrie A., Max M. D. (1999) The extraordinary promise and challenge of gas hydrates. *World Oil*. 220. No 9. P. 49 – 55.
11. Pedchenko, L., & Pedchenko M. (2012). Substantiation of Method of Formation of Ice Hydrate Blocks with the Purpose of Transporting and Storage of Hydrate Gas. *Scientific Bulletin DGU*. 127(1). 28-34.
12. Pedchenko, L., & Pedchenko, M (2015). Elements of the technology of storage gases in the gas hydrate form. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*. Bondarenko, Kovalevs'ka & Ganushevych (eds). Taylor & Francis Group, London. 509-516.
13. 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.
14. Rehbinder, G. (1980). A Theory about Cutting Rock with Water Jet. *Rock Mechanics*, 12(3-4), 247-257.
15. A Theory About Cutting Rock With a Water Jet By G. Rehbinder / *Rock Mechanics* 12, 247--257 (1980). <http://dx.doi.org/10.1007/bf01251028>.
16. 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.
17. Takahashi H. & Tsuji Y. (2004) Japan explores for hydrate in the Nankai Trough. *Oil and Gas J.* – No 33. – P. 48.
18. Helgerud M. B. (2001). Wavespeeds in gas hydrate and sediments containing gashydrate: A laboratory and modeling study. Ph.D. thesis. Stanford Univ. Press. Stanford, Calif. 167 p.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

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

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

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

Наукова новизна. Встановлено і обґрунтовано прояв комплексу чинників в 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.

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

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

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

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

Результаты. Обоснованно 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. Обоснованно 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 обоснованно физические основы процессов обогащения и концентрирования газовых гидратов в горной выработке.

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

ABOUT AUTHORS

Larysa Pedchenko, Candidate of Technical Science, Senior lecturer of the Department extract the oil and gas and geotechnics, National Technical Yuri Kondratyuk University, Pershotravneva av. 24, 36011, Poltava, Ukraine. E-mail pedchenkomm@ukr.net

Nazar Pedchenko, Master of the physics-power engineering faculty, V.N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine.