Актуальні питання нафтогазової галузі

УДК 622.2

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИДОБУВАННЯ ДОННИХ ГІДРАТІВ

С.О. Овецький, О.Ю. Витязь, Я.М. Фем'як, Я.П.Галик

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) ,
e-mail: SergOvet@rambler.ru

Досліджено актуальні питання забезпечення України та інших країн світу новими енергоносіями – донними гідратами. Встановлено, що світові запаси донних гідратів, оцінені за сумарною енергетичною цінністю, перевищують сумарні запаси всіх традиційних енергетичних речовин: нафти, природного газу та вугілля. Детальний аналіз стану розробки методів видобування донних гідратів, а саме: інгібіторний, зниженням тиску і термічний, дозволив ідентифікувати критичні проблемні зони даного напрямку досліджень, а саме: дослідження походження і властивостей донних гідратів; розробка технологічно і економічно ефективних методів видобування донних гідратів; екологічне забезпечення запропонованих методів видобування. Для видобування покладів донних гідратів, які знаходяться у приповерхневій зоні дна акваторії, авторами запропоновано технологію застосування донних земснарядів з використанням фрезерного розрихлювача та енергії кавітаційно-пульсаційного впливу на донні приповерхневі породи.

Ключові слова: донні гідрати, розробка підводних родовищ.

Исследованы актуальные вопросы обеспечения Украины и других стран мира новыми энергоносителями – донными гидратами. Установлено, что мировые запасы донных гидратов, оцененные по суммарной энергетической ценности, превышают суммарные запасы всех традиционных энергетических веществ: нефти, природного газа и угля. Детальный анализ состояния разработки методов добычи донных гидратов, а именно: ингибиторный, снижением давления и термический, позволил идентифицировать критические проблемные зоны данного направления исследований, а именно: исследование происхождения и свойств донных гидратов, разработка технологически и экономически эффективных методов добычи донных гидратов; экологическое обеспечение предложенных методов добычи. Для добычи залежей донных гидратов, которые находятся в приповерхностной зоне дна акватории, авторами предложена технология применения донных земснарядов с использованием фрезерного разрыхлителя и энергии кавитационно-пульсационного воздействия на донные приповерхностные породы.

Ключевые слова: донные гидраты, разработка подводных месторождений.

Investigates essentional problems of providing Ukraine and world by new power mediums – ground hydrates. It is distingnished that global stocks of bottom hydrates, estimated to total energy value, are greater than the total reserves of conventional energy materials: oil, natural gas and coal. A detailed analysis of the development of methods for extraction of the bottom of hydrates, namely, inhibitory, reducing the thermal pressure, allowed to identificate the of critical problem zones of the research areas. They are: a study of the origin and properties of the bottom of hydrates, the development of technologically and economically efficient methods of their extraction, the proposed provision of the environmental methods of their extraction. For the production of bottom deposits of hydrates, which are located in the surface area of the sea floor, the authors proposed a technique of using a benthic dredge milling and baking powder cavitation-energy pulsating effect on the bottom near-surface rocks.

Keywords: ground hydrates, working underwater mine.

Вимоги сучасного світу, які постали перед Україною, а саме подолання енергетичної залежності, потребують пошуків нових нетрадиційних джерел отримання енергоносіїв. Такими для України можуть стати сланцевий газ, газ вугільних пластів, високов'язкі нафти, сірководень Чорного моря, донні відклади гідратів.

Під час однієї з експедицій, в якій досліджували глибоководні райони океану, вчені встановили, що донні гідрати можуть існувати не тільки, як вважалося, в полярних континентальних регіонах, а й у відкладеннях глибоководних материкових схилів. Численні дослідження засвідчили, що газ, який бере участь у

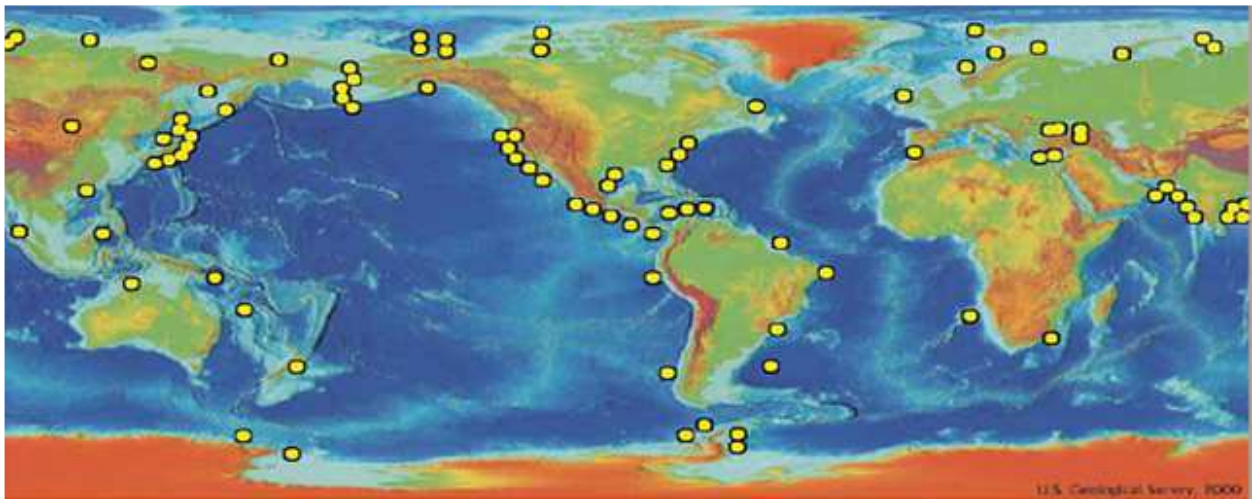

Рисунок 1 – Розповсюдженість розвіданих родовищ гідратів у світі

формуванні гідратів, є продуктом життєдіяльності анаеробних бактерій. При розкладанні бактеріями органічних матеріалів у придонних відкладеннях виділяється метан та інші газоподібні продукти, в тому числі вуглекислий газ, сірководень, етан та пропан. Молекули всіх цих газів можуть входити до структури гідратів, але, зазвичай, присутність метану є переважаючою. Є підстави стверджувати, що зрідка метан, що міститься в гідратах, надходив із термогенних джерел з великої глибини. Завдяки компактній структурі гідрати містять дуже велику кількість метану. Одна об'ємна одиниця гідратів містить газ, котрий займає від 150 до 180 об'ємних одиниць за нормальних умов. Велика частина гідратів зосереджена, на материкових окраїнах, де глибина вод становить приблизно 500 м. У цих зонах вода виносить органічний матеріал і містить поживні речовини для бактерій, в результаті життєдіяльності яких виділяється метан

Великі поклади гідратів були виявлені на шельфі Японії, в районі Блейк Ридж на схід від морського кордону США, на материковій окраїні району Каскадних гір близько Ванкувера (Британська Колумбія, Канада) і на шельфі Нової Зеландії [1]. Свідчень про донні гідрати, отримані шляхом прямого відбору, в усьому світі небагато. Велика частина даних про знаходження гідратів отримана побічними шляхами: за допомогою сейсмічних досліджень, за результатами вимірювань у процесі буріння, зі зміною мінералізації порової води.

Гідрат метану розглядається як один з найперспективніших нових видів вуглеводневої сировини, запаси якого на планеті можуть замінити за енергетичною цінністю усі запаси нафти, вугілля і газу разом узяті (не менше 250 трлн. м^3) [1]. Сучасні дослідження передбачають, що близько 98% світових запасів газових гідратів зосереджено в океані, 2% – на суходолі в зоні вічної мерзлоти [2] (рис. 1). Понад 220 метаногідратних покладів на шельфі океанів і морів виявлено на даний час у світі [3], при цьому найбільші з них знаходяться на дні Атлантичного океану. Деякі поклади виявлені і в Тихому океані, а також на арктичному шельфі.

У деяких районах під дном Чорного моря на глибинах 300-1000 м виявлено газогідратні поклади метану потужністю 400-800 м. У центральній глибоководній частині Чорного моря (в районі Криму) запаси метану в газогідратах оцінюються в 20-25 трлн. м^3, а в усьому Чорному морі, за оцінками геологів України та Росії, – у 60-75 трлн. м^3. Щорічну потребу України в газі до 85 млрд. м^3 Чорне море може забезпечити на декілька десятиліть, а при умові запровадження економії енергетичних ресурсів – на століття.

Вивчення потенціалу гідрату метану як нового джерела енергії розпочали на початку 70-х років [2], але дослідження особливостей його будови, утворення, формування покладів, фазових переходів тощо продовжується і у наш час. Гідрат метану – це супрамолекулярна сполука метану з водою (рис. 2). Під температурним, хімічним і (або) баричним впливом гідрат метану розкладається на воду і природний газ (метан). З одного кубічного метра гідрату метану за нормального атмосферного тиску можна отримати від 164 м^3 до 300 м^3 природного газу.

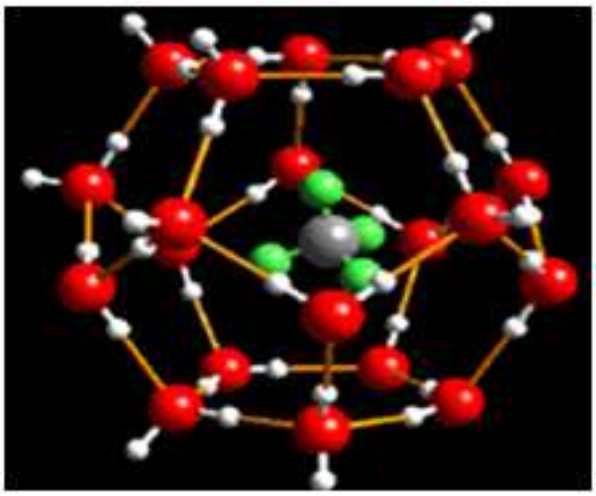

Рисунок 2 – Модель молекули гідрату метану

Рисунок 3 – Вихід донних гідратів на поверхню морського дна

Результати теоретичних досліджень можливостей видобування донних гідратів поки що не можуть бути застосовані на практиці. Країни, які видобувають та імпортують вуглеводні, а тим більше експортують, прагнуть освоїти цей потенційний ресурс, але, не зважаючи на останні успіхи експериментальних досліджень, про економічно рентабельний спосіб отримання газу з донних гідратів поки що не йдеться [4].

В Україні у 1993 році затверджено постанову про виконання програми «Газогідрати Чорного моря» [5], якою передбачений великий обсяг геологорозвідувальних робіт і створення технологій та конструкцій газодобувного комплексу. Реалізація прибуткового інноваційного проекту «Метан - з газогідратів Чорного моря», розробленого в Одеській академії холоду та науково-дослідній фірмі «Лід-Газогідрат», лише в одному невеликому газовидобувному комплексі за рік може дати 0,97 млрд. $м^3$ метану. Основний вплив на донні гідрати за даною технологією полягає у застосування розсолу для вивільнення метану з супрамолекулярної сполуки. Це єдина розроблена в Україні технологія видобування гідратного метану, яка має ряд недоліків:

1. Складності видобування метану з відкладень кристалогідрату та очищення кристалогідрату від мулу на великих глибинах.

2. Через падіння тиску і зростання температури у процесі видобування гідрат починає випаровуватися, і метан, що виділяється, розчиняється у воді або потрапляє в атмосферу.

3. Розплавлення гідрату може призвести до утворення газового міхура. При різкій подачі тепла можлива або так звана "газогідратна бомба" (коли усередині пласта раптово знижується тиск і відбувається локальний вибух), або "чорна дірка" (якщо значна частина пласта газогідрата відірветься від дна і спливе, то, швидко розплавившись, вона вивільнить велику кількість газу). Саме вивільнення великої кількості газу викликало свого часу руйнування видобувних платформ в Каспійському морі.

Крім того, існує небезпека, яка була виявлена у останні роки досліджень [6]: донні гідрати можуть утворюватися не тільки на глибині від 600 м під дном акваторії, а й мати значний потенціальний запас на глибинах від 60 см, і навіть накопичуватися на поверхні морського дна (рис. 3), яке може знаходитися на глибинах акваторій до 200 м. Такі особливості залягання характерні для внутрішніх морів з аномальним газовим режимом, – саме таким і є Чорне море. Тому імовірність виникнення вищеперерахованих проблем зростає у декілька разів. Не вирішують їх і інші способи видобування, розроблені у інших країнах [1]. Наприклад, розроблене німецькими вченими [7] технологія видобування гідратного метану шляхом заміни вуглекислим газом («сухий лід»), не у пласті, а на поверхні морського дна призведе до неконтрольованого виходу метану на поверхню моря, і далі – у атмосферу.

Розробка технологій видобутку метану з гідратов до недавнього часу відбувалася достатньо повільно. Зараз розглядаються три методи: це – зниження тиску, нагрівання і закачування інгібіторов гідратоутворення. Перший метод передбачає зниження тиску до рівня, достатнього для розкладання гідратів. Цей метод можна застосувати тільки там, де можна відбирати вільний газ із зони, прилеглої до зони газових гідратів. При цьому знижується пластовий тиск у зоні газових гідратів, як це відбувалося на Мессоянському родовищі. Якщо під зоною газових гідратів немає вільного газу, то прийнятним рішенням може бути нагрівання до температури, за якої відбувається розкладання гідратів. Прикладом реалізації цього способу мо-

же бути закачування теплої морської води в газогідратних пласт на шельфі.

Закачування інгібіторів, таких як метанол, призводить до зміни значення рівноважних параметрів гідратів (підвищення тиску дисоціації, зниження температури дисоціації). У результаті гідрати розкладаються, і виділяється метан. Найбільш прийнятним методом, з практичної точки зору, є закачування теплої води. Однак газові гідрати можуть вважатися потенційним джерелом вуглеводнів тільки в тому випадку, коли можна довести, що отримана в результаті кількість енергії перевершує кількість енергії, необхідної для процесу вилучення метану.

Розкладання гідратів може призвести до порушення стійкості придонних відкладень на континентальних схилах. Підошва зони газових гідратів може бути місцем різкого зниження міцності товщі осадових порід. Тому вільний газ, утримуваний під зоною газових гідратів (ЗГГ), може опинитися під підвищеним тиском.

Таким чином, будь-яка з технологій розробки родовищ гідратів може стати успішною тільки в тому випадку, якщо буде виключено додаткове зниження стійкості порід. Приклад ускладнень, що виникають при розкладанні гідратів, можна знайти у Атлантичного узбережжя США. Тут ухил морського дна становить 5°. При такому ухилі дно повинно бути стійким. Однак спостерігається багато підводних зсувних уступів. Глибина цих уступів близька до граничної глибині зони стабільності гідратів. Це може служити ознакою того, що в даний час гідрати відсутні, оскільки вони перемістилися. Існує гіпотеза, згідно з якою при зниженні тиску в ЗГГ, як це повинно було відбутися при зниженні рівня моря в льодовиковий період, могло початися розкладання гідратів на глибині і, як наслідок, сповзання відкладень, насичених гідратами.

Для піднімання гідросуміші з твердою корисною копалиною у поверхневих та приповерхневих шарах донного ґрунту використовують цілий ряд видів підводних ґрунтових снарядів, серед яких слід виділити такі, для яких робоча глибина акваторії складе не менше 200 м. На даний час до таких видів обладнання відносять занурювальні насосні агрегати “Молюск-5” і “Молюск-8”. Особливістю цих насосів є герметичний електродвигун, наповнений оливою, оснащений пристроєм, який компенсує теплове розширення оливи і автоматично підтримує його тиск в двигуні таким, щоб він перевищував тиск навколишньої води. У ньому використані ротор і обмотка від асинхронного електродвигуна АОЗ-315М-4.

Заповнений оливою електродвигун забезпечений оливоподібною системою, яка слугує для усунення можливості потрапляння води до порожнини електродвигуна, навіть у тому випадку, коли він розгерметизувався, а також для компенсації температурних розширень оливи і забезпечення невеликого перевищення тиску в порожнині двигуна порівняно з навколишнім середовищем. В цій системі олива подається в двигун з борту судна спеціальним шлангом або енергозабезпечуючим кабелем, в якому воно тече по зазорах між дротами. Необхідний перепад тиску оливи в двигуні забезпечується за рахунок стовпа оливи від баку на судні до рівня води або насосом і дроселем, що автоматично регулює тиск оливи в системі залежно від глибини занурення земснаряду. Якщо олива подається окремим шлангом, то для запобігання потраплянню в двигун води у випадку порушення цілісності шланга на двигуні встановлені клапани, що перекривають вхід у двигун при обриві шланга, що уможливлює витікання оливи назовні під час його нагрівання.

Еластичний енергопульпопровід з регульованою плавучістю включає три еластичні трубопроводи, паралельно з’єднані між собою так, що їх центри лежать у вершинах трикутника. Один трубопровід використовується для подачі пульпи, інший для проводки електрокабеля, інформаційних і управляючих магістралей, а третій трубопровід роздільний на ізольовані один від одного ділянки, що є цистернами з регульованою плавучістю.

Конструкція папильонажної системи земснаряду типу «Молюск» залежить від в'язкості породи, типу «виїмки» і глибини розробки. Під час роботи у нев'язких породах на глибині розробки від 3 до 500 м може застосовуватися метод лійки з вертикальним папильонуванням і періодичним переміщенням землесосної установки в горизонтальній площині. При такій глибоководній розробці за допомогою суднових рушіїв може використовуватися також метод волочіння, буксирування земснаряду із зануреним під воду або плаваючим понтоном.

На базі насосів вказаних моделей для вирішення проблеми підйому корисних копалини з дна Світового океану лабораторія Донецького політехнічного інституту (Донецький національний технічний університет) розробив експериментальний занурений насос «Молюск-9», який ефективно працює на глибині 6000 м. При дотриманні номінальних режимних показників “Молюск-5” може піднімати на поверхню гідрати, але якщо вони будуть мати відповідний фракційний стан. Тому необхідно застосовувати підводне обладнання з фрезерним розрихлювачем, потужність якого визначили за формулами:

потужність, кВт, привода фрези:

$$P_{ф} = m\sum_{0}^{n}(F + F_{зн})\frac{V}{1020\eta}, \qquad (1)$$

де: m =1,2-1,3 – коефіцієнт запасу;

n – число ножів фрези, яка контактує з ґрунтом;

F – зусилля різання гострим ножем, Н;

$F_{зн}$ – додаткова сила різання, викликана зношуванням і затупленням інструмента, Н;

V – швидкість різання м/с;

η – коефіцієнт корисної дії привода фрези;

зусилля різання донних ґрунтів:

$$F = m_y \cdot (1 + ctg\alpha \cdot tg\delta) \cdot bh \frac{1 - \sin\varphi \cdot \cos 2\xi}{1 + \sin\varphi \cdot \cos 2\xi} \cdot k_h k_p C, \quad (2)$$

де: m_y – коефіцієнт впливу швидкості різання;

δ – кут тертя ґрунту до різця;

φ – кут внутрішнього тертя;

b – ширина зрізання, м;

h – глибина зрізання, м;

$\xi = 2\pi - 2\delta - \arcsin(\sin\varphi \cdot \sin\delta)$;

α – кут різання;

$k_h k_p C = C_\phi$ – фактичне зчеплення ґрунту;

k_h – коефіцієнт впливу глибини різання на сили зчеплення;

k_p – коефіцієнт впливу гідростатичного тиску на сили зчеплення;

C – сили зчеплення ґрунту, які визначаються за стандартною методикою.

Крім того, авторами враховано також втрати напору при гідравлічному транспортуванні донних ґрунтів на поверхню за формулами:

для висхідного потоку

$$i_{висх} = i_{0_{висх}} \left(1 + 145 S \frac{gD}{\nu^2} \cdot \frac{\omega}{\sqrt{gD}} \right), \quad (3)$$

для нисхідного потоку

$$i_{нисх} = i_{0_{нисх}} \left(1 - 250 S \frac{gD}{\nu^2} \cdot \frac{\omega}{\sqrt{gD}} \right), \quad (4)$$

де: $i_{0_{висх}}$ і $i_{0_{нисх}}$ – втрати напору під час руху висхідного і нисхідного потоків чистої води по вертикальних трубах, які визначаються за формулою Дарсі-Вейсбаха, м^3/с ;

S – об'ємна концентрація гідратних частинок у гідросуміші м^3/м^3;

D – середньозважена крупність частинок, м;

ν – швидкість гідросуміші, м/с ;

ω – гідравлічна крупність частинок.

Проведений розрахунок для видобування донних гідратів довів можливість застосування даного виду обладнання. При цьому враховувалися напруження, які виникають при різанні льодових структур за методикою [7]. Однак потужність різання на глибинах залягання донних гідратів у Чорному морі для серійних апаратів «Молюск-5» знаходиться на межі можливої, тому для її підвищення пропонується застосувати додатковий кавітаційно-пульсаційний вплив.

Суть нового способу збудження різноманітних по величині ударних імпульсів і коливань тиску з широким діапазоном частот полягає в тому, що на основі кавітаційних явищ в рідинних системах за допомогою спеціального пристрою – кавітатора (пульсатора) – на поверхні руйнованої гідратомісткої породи послідовно створюються ударні імпульси тиску різної амплітуди і широкого спектру "гармонік". В рідині і на поверхні твердого тіла у випадку, якщо підтримується тиск, нижчий за деяке значення критичного тиску, який, в свою чергу, визначається фізичними властивостями і станом рідини, при її русі можуть виділяться пухирці газу або парогазових сумішей, які, потрапляючи в зону з підвищеним тиском, „лускають". Відмінність у розмірах, властивостях і характеристиках парових каверн сприяють виникненню при їх „лусканні " різних за величиною і частотою ударних імпульсів і хвиль тиску, що визначають глибину і інтенсивність руйнування ударними хвилями [8]. При прокачуванні робочої рідини через агрегат генеруються динамічні процеси, в результаті яких виникають ударні гідродинамічні хвилі тиску, що розповсюджуються твердим скелетом породи.

Вихрові і вібраційні види кавітації з'являються в потоці при появі відповідних процесів, достатньо ефективних для появи розривів цілісності потоку рідини. У відповідних умовах експлуатації пульсатора, можуть виникати всі вище згадані види кавітаційних процесів. Зародження газової фази в рідинах є процесом, пов'язаним із значним перетвореннями у властивостях і будові газорідинних систем із багатьма відхиленнями від рівноважних умов виділення газу. Ці перетворення супроводжуються зниженням тиску в суміші при досягненні тиску насичення її газу, їхня інтенсивність особливо значна з урахуванням метастабільних станів газорідинної фази. При цьому міцність рідини і результати формування газової фази в газорідинних системах є функцією від багатьох чинників, пов'язаних зі складом і фізико-хімічними властивостями сумішей, а також із термобаричними показниками і динамікою зниження тиску в середовищі. З цієї причини фактична міцність реальних багатокомпонентних газорідинних систем у ряді випадків є на декілька порядків нижчою за попередні розрахункові значення міцності чистих рідин. Вивчення факторів, які понижують міцність рідин і сприяють інтенсифікації процесів паротворення, дозволяє керовано сконструювати вибійний пульсатор, будову і взаємодію його елементів з метою вибору раціональних характеристик окремих вузлів для регулювання інтенсивності, частоти ударних імпульсів і сили тиску при використанні в якості робочої рідини газорідинних сумішей різного складу. Серед дослідників немає єдиної думки про причини істотних відмінностей в міцності одних і тих же рідин. Згідно результатів досліджень міцність рідин залежить від кількості розчиненого газу. Як наслідок, висунуто гіпотезу про існування в рідинах центрів зниженої міцності у вигляді стабільно існуючих парогазових порожнин, зародкових пухирців і ядер нової фази, що формується. За даними Гарвея, джерелом виникнення пухирів є газ, що міститься в тріщинах твердої межі розділу, де пухир може мати негативну кривизну, що сприяє збереженню його за високих тисків. Проведені дослідження демонструють, що парова (газова) фаза може зберігатися не тільки в тріщинах і западинах твердої поверхні, вона може зберігатися також і в об'ємі рідини, покритої твердими і колоїдними частинками, які створюють оболонки, що перешкоджають змен-

шенню і стисненню пухирців гідростатичним тиском. З цієї причини, область тиску, в якій нафтогазові суміші можуть існувати в метастабільному стані, дуже мала, бо за наявності негативної кривизни вільний газ може існувати в середовищі при тиску, який би істотно перевищував тиск насичення нафти газом. Це означає, що в умовах видобування донних гідратів через наявність безлічі рідких, газових і твердих компонентів початок виділення газової фази при зниженні тиску можна оцінювати без врахування переходу середовища в метастабільний стан за звичайними значеннями тиску насичення газом робочої рідини, що нагнітається в пульсатор. Р.Дін висунув гіпотезу утворення зародкових порожнин за рахунок натягу в рідині, який створюється вільними вихорами в звуковому полі, а також вихорами, що виникають при будь-якому механічному збуренні рідини, яке супроводжується турбулізацією потоку. При цьому пухирець газової фази виникає не в мікрообластях низького тиску при прямому розтягуванні в процесі механічного збурення середовища, а в локалізованих областях низького тиску, пов'язаних з вихорами, що викликаються цим збуренням. Якщо нехтувати гідростатичним тиском, тиск в будь-якій точці прямолінійного вільного вихору визначається співвідношенням [8]:

$$P = -\frac{\Gamma^2 \rho}{8\pi \bar{r}^2} + \frac{2\sigma}{r} \ , \qquad (5)$$

де: P – різниця тиску незбуреної рідини і даної точки вихору;

Γ – циркуляція швидкості;

ρ – густина рідини;

$\bar{r}$ – радіус-вектор даного вихору;

r – радіус пухирця;

σ – поверхневий натяг рідини на межі з парою (газом).

Як видно з виразу (5), зменшення поверхневого натягу рідини на межі з парою (газом) може бути одним із способів зниження міцності робочої рідини. Згідно з гіпотезою Гіббса виникнення зародка газової фази відбувається внаслідок теплового хаотичного руху молекул. Водночас вважається, що у будь-якій рідкій системі внаслідок теплового руху молекул повинні виникати локальні згущення і розрідження середовища статистичного характеру, тобто флуктуації густини. Якщо останні досягають значної величини і виходять за межі, сумісні з початковим агрегатним станом, то система стає нестійкою, її термодинамічний потенціал зростає, досягаючи максимуму в області метастабільного стану. За наявності твердих меж розділу в процесі утворення пухирця пари в рідині термодинамічний потенціал змінюється згідно із законом:

$$\Delta\Phi = \pi\sigma\left(-\frac{2r^3}{3r_0} + r^2\right)\cdot(2 + 3\cos\Theta - \cos^3\Theta) \ , \qquad (6)$$

де: σ – поверхневий натяг на межі з парою;

r_0 – критичний радіус зародка (радіус, відповідний метастабільному стану з максимумом термодинамічного потенціалу);

Θ – кут змочування;

r – радіус зародка.

З (6) випливає, що істотний вплив на процеси виникнення газової фази в рідині має змочуваність. В об'ємі рідини (Θ=0) вірогідність утворення зародка за рахунок флуктуації менша, ніж на твердій поверхні розділу. При зміні кута змочування Θ від 0° до 90° приріст потенціалу зменшується в 2 рази.

Корнфельд отримав наближене співвідношення, що характеризує величини міцності рідин за інших рівних умов в об'ємі ($Z_{ОБ}$) рідини і на поверхні розділу ($Z_{ПОВ}$) залежно від кута змочування:

$$\frac{Z_{ПОВ}}{Z_{ОБ}} = 1.2\frac{1+\cos\Theta}{2}\sqrt{2-\cos\Theta} \ . \qquad (7)$$

З (7) витікає, що при зниженні змочуваності міцність рідини на межі з твердим тілом істотно зменшується. Це означає, що як робочу рідину доцільно використовувати воду, або водонафтові суміші, які погано змочують метали, або рідини із спеціальними реагентами.

На сьогодні встановлено, що різного роду механічні коливання, які виникають при русі рідини по трубах, сприяють значному зниженню її міцності. В динамічних умовах кавітація (наприклад, в ультразвуковому полі) виникає при енергіях в десятки разів менших, ніж необхідно для створення тиску, рівного тиску пружності насичених парів. Із збільшенням швидкості зниження тиску міцність рідини знижується.

При обробці породи має місце високий тиск, тож для виділення газової фази з робочої рідини необхідний пристрій, що дозволяє інтенсивно знижувати тиск, аж до зони метастабільного стану. Це може бути здійснено шляхом формування ударного режиму закипання рідини при її витіканні із насадок з виникненням адіабатних потоків у зоні дії пульсатора.

Інтенсифікація ударних механізмів диспергування потоків рідкої фази з виділенням парової (газової) фази може бути здійснена при зустрічі швидкісних потоків і струмин робочої рідини з нерухомим екраном.

З наведених матеріалів щодо механізму зародження парової або газової фази в рідких системах випливає, що для інтенсифікації процесу пароутворення і його регулювання за допомогою пульсатора можна використовувати робочу рідину визначеного складу і фізико-хімічних параметрів, або його конструктивні особливості, які б сприяли турбулізації потоків і формуванню різних режимів закипання рідини з подальшим виникненням гідравлічних ударів як наслідок „лускання" парових каверн, що утворилися.

Як було зазначено вище , за походженням і характером течії можливі наступні види кавітації: вихрова, вібраційна, приєднана і рухома. Умови виникнення парової кавітації, якщо не враховувати вплив розчиненого газу, визнача-

ється параметром динамічної подібності (число кавітації К):

$$Ki = \left(\frac{2 \cdot (P_0 - P_S)}{\rho \cdot V_0^2} \right) \geq 1 , \qquad (8)$$

де: Ро – статичний тиск в деякій точці потоку, Па;

Ps – тиск насиченої пари в пухирці, Па;

Vo – швидкість потоку при постійному тиску Ро , м/с;

ρ – густина рідини, кг/м^3.

Чим менше значення Кі при постійному тиску Ps, тим більш допустиме зниження тиску в системі до початку кавітації.

З (8) випливає, що при витіканні рідини з насадок і зміні режимів течії таким чином, щоб К ставало більшим, меншим або рівним Кі, можна відтворювати різні режими течії – від безкавітаційного до режиму з розвиненою кавітацією.

На процес кавітації впливають поверхневий натяг, в'язкість тощо. Ряд цих параметрів не враховується числом кавітації К, але вони враховуються іншими безрозмірними комплексами, що визначають властивості потоків (Re, Fr, We).

Як наслідок з (8), числом кавітації є не що інше, як відношення повного тиску, при якому відбувається „лускання" пухирця, до швидкісного напору (тиску) потоку.

У зв'язку з тим, що критичні тиск і температура води відповідно рівні Ркр = 22,1 МПа і Ткр = 374,15°К, парову кавітацію на великих глибинах акваторіії (більше 2000 м) спровокувати неможливо (тиск в затрубному просторі перевищує критичний тиск рідини Ркр).

Слід зазначити, що на значних глибинах акваторії може виникати так звана «газова кавітація» за рахунок розчиненого в рідині газу. Газ може виділятись з води в зоні лобових і дотичних ударів струмин рідини до стінки обсадної колони з наступним диспергуванням потоку на дрібні частинки та утворенням газопарових бульбашок. Кількісну оцінку кавітації „ударного" походження неможливо дати з причини недостатньої вивченості її природи.

Також оцінити виникнення кавітаційних явищ можна за наступною залежністю:

$$\Delta P_{KAB} = P - \frac{\rho \cdot Q^2 \cdot (R_K^4 - R_{MIN}^4)}{2 \cdot \pi^2 \cdot R_K^4 \cdot R_{MIN}^4} , \qquad (9)$$

де: Р – тиск перед насадкою, Па;

ρ – густина рідини, кг/м^3;

R_K і R_{MIN} – відповідно кінцевий і мінімальний переріз насадки, м;

Q – витрата рідини через насадку, м^3/с.

При $\Delta P_{KAB} \leq 0$ відбувається розрив потоку.

Природа виникнення кавітації при видобуванні донних гідратів самозакипаючими адіабатними потоками може бути віднесена до вихрової, вібраційної, приєднаної і рухомої. Парова фаза при цьому виникає у випадку витікання крізь насадку. Згідно з експериментальними даними при витіканні води в режимі самозакипаючого потоку крізь насадки діаметром 3-5 мм за швидкостей потоку, які можна забезпечити в реальних умовах, коефіцієнт метастабільності складає 0,7. Звідки випливає, що на виході з насадки в потоці міститься близько 30% диспергованої парової фази, яка викликає кавітацію.

За необхідності збільшити глибину видобування можна застосуванням турбогідронасосів (до глибини 6000 м).

При піднятті ґрунтосуміші з гідратами на поверхню початкове їх всмоктування відбуватиметься у твердому стані. У подальшому при переміщенні у вертикальному трубопроводі гідрати в міру зниження тиску і температури будуть виділяти метан, тому цей трубопровід необхідно під'єднувати до гідратозбірних і переробних пристроїв.

Початкові капіталовкладення при застосуванні даної технології у 10-15 разів менші, ніж при застосуванні обробки пласта соляним розчином, яка потребує капіталовкладень на рівні 7 млрд. у.о. Також суттєво знижується собівартість видобування гідратів і його екологічна безпечність (неконтрольовані втрати метану у аварійній ситуації не перевищують 1 %, на відміну від інших способів експлуатації, у яких такі втрати складають від 4 до 25%).

Основним подальшим завданням даного напрямку досліджень є оцінка величини запасів гідратів Чорного моря, які знаходяться у приповерхневому донному шарі.

Література

1 Gas methane from Ice House. Coiled Tubing is ready to extract gas from gas hydrated deposits // Coiled Tubing Times. – 2012. – 1(39). – P. 58 – 62.

2 Михайлюк О.Л. Видобуток енергоносіїв на шельфі Чорного та Азовського морів / О.Л. Михайлюк // Стан і перспективи використання ресурсів гідрату метану зони Чорного моря: Збірник матеріалів науково-практичної конференції «Проблеми соціально-економічного розвитку українського Причорномор'я в умовах фінансово-економічної кризи (Одеса, 3 березня 2009 р.). – 2009. – С. 151-160.

3 Киселев И. США нужен «горючий снег». – 20 ноября 2007. – www.vz.ru/economy/ 2007/11/20 /126116. html - 40k/.

4 Про пошуки газогідратної сировини в Чорному морі і створення ефективних технологій її видобутку та переробки // Постанова Кабінету Міністрів №938 від 22 листопада 1993 р.

5 Теоретические основы построения проточной части корпусно-секционных насосов с варьируемыми робочими характеристиками / Алиев Н.А., Дедков В.Н., Сухоребрый П.Н., Хорев О.Н // Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: Сб. научн. трудов – НДІГМ ім. М. М. Федорова. – Донецк: НИИГМ им. М.М.Федорова, 2005. – С. 123-135.

6 Алиев Н.А. Основы построения проточной части корпусно-секционных насосов с варьируемыми робочими характеристиками / Н.А. Алиев // Матеріали міжнародної конференції «Форум Гірників», 12-14 жовтня 2005 р. – 2005. – Т. 1. – С.18-27.

7 Хотнянська О.В. Визначення ефективності активного протильодового захисту морських стаціонарних платформ [Текст] / О.В. Хотнянська, С.О. Овецький // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2009. – № 4 (22). – С. 61-67.

8 Возний В.Р. Розроблення методики практичного розрахунку оптимізації кавітаційно-пульсаційного методу інтенсифікації припливу вуглеводнів [Текст] / В.Р. Возний, С.О. Овецький, Я.М. Фем'як, М.В. Марусич // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2008. – № 2 (27). – С. 35 -38.

Стаття надійшла до редакційної колегії 08.05.12
Рекомендована до друку професором ***Копеєм Б.В.***