
doi: <https://doi.org/10.15407/gpimo2018.03.022>

С.В. Гошовский, А.В. Зурьян

Украинский государственный геологоразведочный институт, Киев

РАЗРАБОТКА ГАЗА МЕТАНА ИЗ СИПОВ, ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ И МОРСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГАЗОГИДРАТОВ

Приведен теоретический анализ особенностей разработки газа метана из глубоководных месторождений. Систематизированы способы и технологии добычи газа метана из газогидратных формирований, сипов и грязевых вулканов. Дана классификация способов добычи метана из природных газогидратов.

Ключевые слова: газогидраты, нетрадиционный источник углеводородного сырья, газовые месторождения, метаногидраты, сипы, грязевые вулканы, технологии добычи, Черное море.

Структура баланса потребляемой энергии быстро меняется в зависимости от уровня развития цивилизации. В первой половине XIX века превалировало использование угля, во второй половине — нефти и природного газа [17]. К концу XX века, по мере истощения ресурсов природных газов и, одновременно, расширения областей их применения и увеличения практической значимости в мировом народном хозяйстве, почти повсеместно усилилось внимание к изучению нетрадиционных ресурсов газа. Хотя некоторые из них, такие как газы угольных месторождений, исследуются и изучаются давно и есть серьезные результаты опытно-промышленной и промышленной добычи в разных странах. Добыча нетрадиционного газа из других значимых его источников — низкопроницаемых коллекторов и сланцевых формаций — в значимых масштабах осуществляется пока только в США [44]. Следует отметить, что промышленная добыча связана со значительным применением дорогостоящего оборудования и материалов, а также влиянием на окружающую среду и неоднозначным отношением населения к применению этих технологий. Все это сказывается на экономических показателях, которые не способствуют расширению географии добычи.

В такой ситуации энергетическая проблема может быть решена за счет природных газовых гидратов, которые многие уче-

© С.В. ГОШОВСКИЙ, А.В. ЗУРЬЯН, 2018

ные считают одним из основных ресурсов будущего. В недрах Земли и в акваториях Мирового океана существуют практически неограниченные ресурсы природного газа в твердом гидратном состоянии, доступные большинству стран мирового сообщества [17].

Количество газа в газогидратных (ГГ) залежах на нашей планете составляет $(16—14000) \cdot 10^{12} \text{ м}^3$ [36]. Это энергетический резерв человечества более чем на тысячу лет. Поэтому разработка ГГ месторождений — важная мировая научно-техническая проблема [15]. Материковые залежи газовых гидратов на территории Украины отсутствуют из-за особенностей ее геолого-морфологического строения. В 90-х годах XX столетия в Украине обнаружены подводные месторождения газовых гидратов в Черном море в 45 км южнее г. Ялта. Объединением «Южморгеология» был организован ряд экспедиций, пробурены скважины, получены керны с образцами газовых гидратов. По данным исследователей и участников экспедиций (Ю.А. Бяков, Р.П. Круглякова [6], Е.Ф. Шнюков, В.П. Коболев [41]), газогидраты, поднятые с глубоководной части Черного моря, содержат в среднем до 95% метана. Перспективная оценка газоносности черноморских недр наиболее четко отражена в работах [19, 42, 41]. Почти вся глубоководная часть Черноморской впадины по утверждению многих исследователей [6, 7, 13, 17, 18, 41, 43] является благоприятной для гидратообразования. Региональные геофизические исследования этих авторов позволили получить пространственную картину распространения газогидратов в Черном море. Образование их возможно на глубинах 300—350 м, а для чистого метана — начиная с мощности водной толщи 700—750 м. В работах [19, 41, 42] определена нижняя граница развития гидратов в толще осадков по геофизическим данным от 400—500 м до 800—1000 м ниже дна моря. Многие из выводов и картографических построений этих авторов во многих случаях можно отнести к апостериорным, так как количество фактического материала, по которому делается заключение, не охватывает всей территории Черного моря. В то же время сравнение территории Черного моря, геологического строения, тектонических особенностей и т.п. с аналогами в Мировом океане позволяют согласиться с выводами авторов о перспективности акватории Черного моря как зоны формирования значительных залежей газогидрата метана.

Для разработки таких месторождений в будущем необходимо отработать методологически всеобъемлющую и максимально щадящую для окружающей природной среды технологию добычи газа из месторождений газовых гидратов. Требуется разработка комплексного подхода к освоению данного природного ресурса. Учитывая широкомасштабные мировые исследования в этой области, становится очевидным, что необходимо досконально исследовать характер взаимодействия всех процессов в рассматриваемых системах, детально изучить фазовые переходы газогидратных систем различного состава в каждом конкретном месторождении и учитывать их при разработке схем извлечения ресурса [21]. Актуальность таких исследований подтверждается отсутствием научно обоснованных разработок, признанных мировыми лидерами добывающей промышленности. Этими проблемами сегодня широко занимаются химики, экологи и ученые других специальностей. На сегодняшний день, приходится констатировать: отсутствует технология разработки месторождений газовых гидратов, основанная на реалиях горнодобывающей науки.

Разработка газогидратных месторождений традиционными методами нефтегазовой промышленности вызывает, мягко говоря, затруднения. Существующие методы, описанные в работах таких ученых как Макогон Ю.Ф., Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Гошовский С.В., Сиротенко П.Т., Пасынков А.А., Басниев К.С., Назаретова А.А., Воробьев А.Е., Капитонова И.Л., Тохиди Б., Архманди М., Андерсон Р., Ян Ц, Кунсбаева Г.А., Матвеева Т.В., Максимова Э.А., Решетников А.А., Голованчиков А.Б., Басниев К.С., Щебетов А.В., Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Шагапов В.Ш., Сыртланов В.Р., Чиглинцева А.С., Воронов В.П., Городецкий Е.Е., Муратов А.Р., Сафонов С.С., опираются на процесс диссоциации (разделение), при которой газогидраты распадаются на газ и воду [3, 4, 9, 10, 11, 16, 23, 34, 35, 38, 39, 40]. В этих технологиях предлагается три основных метода разработки залежей газогидратов: разгерметизация (снижение давления), нагревание и ввод ингибитора. Привлекает внимание технология закачки в пласт углекислого газа. Электромагнитные и акустические методы воздействия на гидратонасыщенную породу пока изучены мало [13].

Методы разработки газогидратных месторождений определяются физико-химическими свойствами газовых гидратов, термобарическими, геологическими условиями их образования и сохранения устойчивого состояния, другими физико-химическими факторами.

В работе [5] выделены три наиболее известные технологии добычи газа из скоплений газогидратов:

- искусственное снижение давления в пласте газовых гидратов до уровня их разложения посредством откачки воды из скважины; технология реализована на Мессояхском месторождении (Россия) в 1967 г;
- нагрев залежи до температуры разложения газовых гидратов; технология заключается в закачке пара или горячей воды в пласт, опробована канадскими исследователями у реки Маккензи при участии ученых США, Японии, Германии и Индии;
- закачка ингибиторов, таких как метанол или гликоль, что приводит к разложению газогидратов и выделению газа.

Перспективны технологии добычи природного газа, предполагающие механическое разрушение газогидратов, в частности способ, связанный с разрушением гидратосодержащей породы шнековым буром [31], при помощи гидроразрыва пласта [30], в том числе направленного [28]. При этом ни в одном из исследуемых научных источников не упоминается метод разрыва с помощью взрывного вещества (ВВ) или пороховых газов (ПГ) который по динамической эффективности не хуже чем гидроразрыв, а по экономическим показателям превосходит традиционный гидроразрыв пласта.

Разгерметизация — наиболее технологически простая и перспективная сегодня технология разработки газогидратных месторождений. Ее суть состоит в искусственном понижении давления в пласте вокруг скважины, которое достигается за счет понижения давления в буровой скважине или за счет сокращения давления на газогидраты воды или свободного газа после их частичной откачки. Когда давление в слое газа ниже, чем фазовое равновесие газогидрата, газогидрат начинает распадаться на газ и воду, поглощая при этом тепловую энергию окружающей среды. Разгерметизация применяется для разработки газогидратов, залегающих в породах высокой проницаемости на глубине более 700 м.

Преимуществами данной технологии являются сравнительно невысокие затраты; простота процесса извлечения газа и возможность относительно быстрой добычи больших объемов.

Недостатками данной технологии является то, что при низких температурах высвобождающаяся в ходе разгерметизации вода может замерзнуть и закупорить оборудование, что требует разработки и применения дополнительных технологий.

Технология нагревания имеет несколько разновидностей. Во-первых, это нагревание с помощью метода впрыскивания теплоносителя. Во-вторых, это нагревание с помощью метода циркуляции горячей воды. И, в-третьих, это нагревание с помощью метода разложения газовых гидратов с использованием пара или другого нагретого газа или жидкости. Также существует метод прямого нагревания с использованием электричества.

Преимуществами данной технологии являются простота и отсутствие необходимости в применении сложной техники.

Недостатками данной технологии являются высокие затраты энергии на нагревание и подведение теплоносителя к пласту; невозможность добычи из пластов глубокого залегания; относительно медленное и ограниченное по объемам разделение гидрата метана на газ и воду. Кроме этого, необходимо обратить внимание на необходимость постоянного увеличения объемов подводимой тепловой энергии и требование повышенных мер контроля при добыче газа из пластов в зоне вечной мерзлоты.

Введение ингибитора рассматривается как способ нарушения фазового равновесия газогидрата и понижения его температуры. Существует несколько разновидностей данной технологии. Во-первых, это подача горячих пересыщенных растворов хлорида или бромида кальция, или их смеси под давлением вниз по скважине. При этом вода газового гидрата абсорбируется солями с выделением тепла. Во-вторых, это подача в зону залегания газовых гидратов относительно теплой морской воды или воды, взятой с уровня выше уровня залегания газовых гидратов. Подача осуществляется через аппарат, обеспечивающий контакт с газовым гидратом, что приводит к разложению гидрата. Затем жидкость переносится в другую часть аппарата, неся захваченные пары углеводородов в виде пузырей, которые могут быть легко отделены от жидкости. После короткой процедуры запуска процесс и аппаратура работают в самоподдерживающем режиме. И, в-третьих, это сочетание стадий: 1 — экзотермическая химическая реакция жидкой кислоты и жидкой щелочи, в результате которой образуется горячий солевой раствор; 2 — контакт газового гидрата с горячим солевым раствором и разложение части газового гидрата; 3 — подъем водно-газовой смеси из скважины; 4 — отделение природного газа от солевого раствора.

Преимуществами данной технологии являются: возможность контроля над объемами добычи газа за счет объемов введения ингибитора; предотвращение замерзания воды, образования гидратов и закупорки оборудования скважины.

Недостатками данной технологии являются высокая стоимость; медленное протекание химической реакции ингибитора с газогидратом; экологическая опасность, которую могут представлять собой ингибиторы [11].

В последнее время в странах, обладающих огромными ресурсами газовых гидратов, активизировался поиск инженерных решений проблемы добычи углеводородов из газовых гидратов [8].

Сложность и необычность этой проблемы, как было отмечено выше, состоит в том, что газовый гидрат — твердый материал, самопроизвольно газифицирующийся [32] при снижении давления или повышении температуры. Но снижение давления без подвода тепла приводит к эндотермическому охлаждению [33], контактная поверхность покрывается коркой льда, которая ограничивает диффузию и дальнейшее образование газа, теплоперенос внутри газового гидрата. Во многих случаях это тепло необходимо подводить в грунт на большую глубину, для чего разработан ряд методов и способов [2]. Так же непростыми условиями добычи углеводородов можно считать насыщение газогидратов несцементированными песками, которые после разделения газогидратов на газ и воду подхватываются разделенными составляющими и, устремляясь в восходящий поток, оседают в насосно-компрессорных трубах (НКТ). Это приводит к аварийным ситуациям вследствие засорения ЕКТ песком и возможно вторичным замерзанием его в трубах.

Зарегистрированы патенты с перспективными по нашему мнению методами получения углеводородов из газовых гидратов:

1. *Метод получения углеводородов из газовых гидратов, предложенный McGuire [US Pat. N 4424866, E 21 B 043/24, January 10, 1984].* Метод заключается в подаче горячих пересыщенных растворов CaCl_2 или CaBr_2 или их смеси под давлением вниз по скважине к зоне залегания газовых гидратов. Вода газового гидрата абсорбируется солями с выделением тепла. Таким образом, эти растворы способствуют разложению твердых газовых гидратов и освобождению содержащегося в них природного газа.

2. *Метод и аппаратура получения углеводородов из газовых гидратов, предложенные Elliott et al. [US Pat. N 4424858, E 21 B 033/12, January 10, 1984].* Суть метода состоит в подаче в зону залегания газовых гидратов относительно теплой морской воды или воды, взятой с уровня выше уровня залегания газовых гидратов. Подача осуществляется через аппарат, обеспечивающий контакт с газовым гидратом, что приводит к разложению гидрата. Затем жидкость переносится в другую часть аппарата, неся захваченные пары углеводородов в виде пузырей, которые могут быть легко отделены от жидкости. После короткой процедуры запуска, процесс и аппаратура работают в самоподдерживающем режиме.

3. *Метод и аппаратура для разложения газовых гидратов с использованием пара или другого нагретого газа или жидкости, предложенные Heinemann et al. [US Pat. N 6028235, C 07 C 007/20, February 22, 2000].* Метод основан на использовании устройства, помещаемого рядом с газовым гидратом или внутри его, позволяющего нагревать газовый гидрат газом или жидкостью (предпочтительно паром). Газовый гидрат может быть подвергнут нагреву непосредственно газом или жидкостью или косвенно через теплопроводящую катушку или канал. Высокая температура газа или жидкости приводит к разложению газового гидрата в соответствующие газовую и водную фазы. После разложения газовый компонент может быть собран для дальнейшего хранения, транспортировки или использования.

4. *Метод и аппаратура для разложения газовых гидратов, предложенные Chatterji et al. [US Pat. N 5713416, E 21 B 43/24, February 3, 1998].* Метод основан на сочетании стадий: экзотермической химической реакции жидкой кислоты и жидкой щелочи, в результате чего образуется горячий солевой раствор; контак-

та газового гидрата с горячим солевым раствором с разложением, по крайней мере, части газового гидрата; подъем водно-газовой смеси из скважины; отделение природного газа от солевого раствора [32]. Приведенные способы добычи углеводородов из газовых гидратов обладают рядом существенных недостатков. Так, использование растворов солей осложняется проблемой коррозии труб и оборудования, создание потока пламени связано с проблемами управления этим «подземным пожаром». Методы с использованием жидких органических растворителей малоэкономичны ввиду больших и неизбежных их потерь и экологических проблем. Эффективное микроволновое воздействие также требует теплоподвода. Захоронение саморазогревающихся ядерных отходов при несомненном преимуществе непосредственного контакта источника тепла с газовыми гидратами также связано с экологическими проблемами, защитой от радиации и т. д. Наиболее оптимальной является схема декомпрессии. Но эта схема также неизбежно требует решения проблем подвода тепла, компенсирующего теплоту разложения газовых гидратов. Закачка воды (или пара) с последующим возвратом газо-водной пульпы приводит к стабилизации газовых гидратов и требует существенного повышения температуры, особенно при больших глубинах залегания газовых гидратов. Кроме того, здесь возникают проблемы теплопотерь при транспортировке горячей воды (или пара) «сверху вниз», которые дополнительно могут приводить к неблагоприятному экологическому режиму вокруг скважины [33]. Таким образом, основным условием, характерным для всех способов добычи природного газа из газовых гидратов, является необходимость подвода тепла к зоне разложения. Одним из источников тепла может служить природный газ, содержащийся в газовых гидратах. К данному способу добычи природного газа из газогидратов относится способ, предложенный Agee, et al.

5. *Способ и аппаратура получения углеводородов из газовых гидратов Agee, et al [US Pat. N 5950732, C 10 G 002/00, September 14, 1999].* Суть этого способа заключается в использовании системы для переработки природного газа получаемого из газовых гидратов в сжижаемые углеводороды. Она включает судно, подсистему позиционирования судна над зоной залегания газовых гидратов, аппарат для добычи газовых гидратов, соединенный с системой отделения газа от гидратов и перекачки газа от места добычи на судно, подсистему конверсии газа для преобразования газа в сжижаемые углеводороды. Метод решает задачу создания нового эффективного способа подвода тепла к зоне разложения газовых гидратов и, соответственно, добычи из них природного газа [1]. Теплоподвод осуществляют за счет проведения в зоне разложения газовых гидратов экзотермической каталитической реакции с удельным тепловыделением, превышающим теплоту диссоциации твердого газового гидрата. В качестве каталитической реакции используют окисление или электрохимическое окисление метана в синтез-газ или частичное окисление метана до CO_2 и воды или окислительную димеризацию метана или окисление метана в метанол. Выделившийся газ подвергают дополнительной химической переработке непосредственно в зоне добычи.

6. *Способ получения гидрата метана либо иного газа согласно патенту (GB 2347938 A, 2000, C 07 C 7/152).* Газ реагирует с водой в реакционном сосуде при давлении и температуре, которые необходимы для образования гидрата. Верхняя часть сосуда заполнена газовой фазой, нижняя — жидкой фазой. Вода

распыляется через сопла, находящиеся в верхней части реакционного сосуда. Для образования капель жидкости также может использоваться ультразвуковая вибрирующая пластина в газовой фазе, содержащей гидратообразующую субстанцию. Ультразвуковая вибрирующая пластина используется для разрушения гидратных оболочек на поверхности больших капель воды, что приводит к реакции всей жидкой капли с образованием гидрата. Изобретение относится к способам добычи и первичной переработки природного газа из твердых газовых гидратов [2].

Как видно из приведенных примеров, проведение контролируемых экзотермических каталитических реакций в зоне залегающих газовых гидратов позволяет использовать выделяющееся тепло для разложения газовых гидратов и, соответственно, дает возможность промышленной добычи природного газа из газовых гидратов. При этом продукты реакций являются весьма ценным химическим сырьем, которое можно использовать как непосредственно в качестве топлива (например, водород или метанол), так и для дальнейших химических превращений (например, получения более тяжелых углеводородов в процессах Фишера-Тропша, окислительной димеризации и др.) [46].

Значительный интерес специалистов различных стран вызывает технология извлечения газа, заключающаяся в закачке в газогидратный пласт углекислого газа, что сопровождается вытеснением метана и образованием гидратов углекислого газа, более стабильных, чем гидраты метана [5, 28, 29]. Такая технология позволяет не только извлечь метан из газовых гидратов, но и решить актуальную проблему нашего времени — уменьшение объемов парниковых газов в атмосфере за счет депонирования углекислого газа под землей. Данная технология, как и некоторые другие методы воздействия на газогидраты, в частности электромагнитные и акустические, требуют более широкого экспериментального изучения.

В работе [21] делается вывод, что ошибка многих разработчиков заключается в том, что предлагается либо извлекать льдоподобные массы на поверхность, либо извлекать воду, насыщенную газом, на поверхность по эрлифтным колоннам, а лишь потом производить сепарацию и извлечение газа. Такие способы слишком энергозатратны, вследствие чего экономически не привлекательны. Например, известно множество способов добычи газа из газовых гидратов донных отложений путем растворения верхнего слоя скоплений газовых гидратов водой с естественной температурой водоема, путем подачи ее в опущенный на дно колокол, с образованием в нем водно-газовой смеси с метаном и его гомологами с последующим откачиванием смеси на поверхность эрлифтными установками. Такие способы являются весьма громоздкими и затратными, поскольку нуждаются в использовании значительных объемов металлосодежающих конструкций, которые будут подвержены интенсивной коррозии вследствие агрессивности морской воды, предусматривают транспортировку огромных объемов воды с низким содержанием газа и пригодны лишь на малых глубинах и на ограниченных по площади участках. Наряду с этим, процесс диссоциации представляет собой неуправляемый процесс.

Также известны способы разработки месторождений твердых углеводородов путем разбуривания залежи скважинами с системой замкнутых горизонтальных боковых секций, с последующим формированием неконтролируемого теплово-

го поля в нижнем пласте и отбор углеводородов из верхнего газогидратного пласта. В процессе эксплуатации предполагается непрерывно поддерживать влияние на пласт горячей воды с ее постоянной циркуляцией по образованным замкнутым каналам. Отбор водно-газовой смеси предлагается производить методом эрлифта, с последующей ее сепарацией на поверхности.

Такие методы предполагают наличие огромных объемов горячей воды, и транспортировки этих значительных объемов, а также многоуровневой схемы разработки и необходимость дальнейшей сепарации. Также такие методы, ввиду площадного нагрева, чреваты неконтролируемостью всего процесса разложения газогидратного массива. При подаче ингибиторов внутрь газогидратного слоя происходит изменение состава газового гидрата. В многочисленных работах, посвященных исследованию действия ингибиторов, показано, что введение ингибитора определенной концентрации в газовый гидрат приводит к сдвигу равновесных условий гидратообразования, а именно — к сдвигу равновесной температуры гидратообразования, способствуя диссоциации гидратов и высвобождению содержащегося в них метана. Так что, казалось бы, метод представляет определенный интерес. Но при этом будет происходить ширококомасштабное техногенное воздействие химических реагентов на воды мирового океана ввиду широкого распространения газовых гидратов на планете Земля. Это может нанести непоправимый ущерб жизни в океане. Также ингибиторы имеют высокую степень токсичности (как при действии паров, так и при попадании на кожные покровы и внутрь организма) и высокую пожароопасность, что при добыче метана нежелательно. Для этого метода имеются свои минусы и с технологической точки зрения, а именно, что при выборе того или иного ингибитора нужно учитывать большое количество факторов: технологические особенности ингибитора, коррозионную активность основного реагента, входящего в состав ингибитора, совместимость ингибитора с минерализованной (морской) водой и с другими реагентами [21].

Известны методы, основанные на двукратном гидратообразовании. Исследователями предлагается осуществлять сбор у поверхности дна первоначально самостоятельно выделенного из залежи метана в виде газа в соответствующий коллектор. Коллектор имеет якорь для установки на дно. Он также снабжен множеством трубок, проходящих через камеру и образующих теплообменник, через который прокачивают охладитель, что обеспечивает перевод поступающего газа в твердое состояние. Затем, в коллекторе с внутренней камерой, имеющей вход для собранного газа и выход для отбора газа при поднятии коллектора на поверхность, осуществляется перевод газа в твердое состояние и его подъем на поверхность специальным внешним механизмом. Полнота заполнения устройства контролируется установлением в камере индикатора уровня (патент США №2007145810, E02F 7/00). Очевидно, что такой методический подход весьма громоздок и имеет низкую производительность при высоких энергозатратах. В литературе имеется множество аналогичных подходов, которые также отличаются сложностью и громоздкостью оборудования, явно низкой производительностью и отрицательным влиянием на экосистему (патент РФ № 2078199, E21B 43/01). Выбор технологии разработки зависит от геолого-структурных особенностей конкретного месторождения, а принятая система разработки должна отвечать оптимальным технико-экономическим показателям и требованиям охраны

окружающей природной среды. Для достижения этой цели необходимо с максимально возможной степенью вероятности понимать все процессы, происходящие в газогидратном пласте.

В научной литературе существует несколько технологий влияния тепловым источником на газовый гидрат с целью добычи из него газа метана. Однако, независимо от способа донесения теплоносителя в пласт, там будут происходить процессы по законам передачи тепла в твердой среде.

В работах [21, 20] автором предлагается метод комплексного подхода к оценке исходных параметров горно-геологических условий месторождения. А именно, разработка газогидратной залежи проводится на основе расчета скорости продвижения теплового поля по твердому телу пласта с учетом средневзвешенных значений удельной теплопроводности, плотности скелета вмещающих пород и удельной теплоемкости.

Основным принципом предлагаемой системы разработки газогидратного пласта при этом остается сдвиг фазового равновесия газового гидрата в сторону его диссоциации с выделением газа и воды, с полным оставлением воды и вмещающих пород в пласте. Авторами предполагается, что данный подход позволит получать газ в непрерывном режиме с контролируемым дебитом на поверхности плавучих платформ, как на малых, так и на больших глубинах с минимальным влиянием на подводную экосистему.

На основе этого же подхода строятся методы разработки сланцевого газа описанные в работе [7]. Для достижения поставленной цели был выполнен анализ геологического строения дна Черного моря в газогидратобразующих зонах и способов добычи природного газа из гидратных залежей. По мнению авторов [7], наиболее эффективным способом разрушения донных гидратов с целью извлечения газа метана является сочетание разгерметизации (проведение скважин), нагрева (струями воды с температурой выше, чем в гидратах) и механического разрушения (воздействие струй воды на гидратную залежь).

Сущность предлагаемого способа заключается в механическом разрушении донных гидратных осадков, при котором нужно учитывать перераспределение давления в гидратной залежи после проведения эксплуатационной скважины и влияние температуры водяной струи. Процессом непосредственной добычи газа метана является разрушение вандерваальсовых связей газогидратов, которое осуществляется с помощью воздействия на них высоконапорных струй воды и высвобождением газа метана.

Как было сказано выше, существуют основные четыре принципиальных подхода к добыче газа из природных залежей газовых гидратов, это: снижение давления ниже условия фазового равновесия, нагрев гидратосодержащих пород выше равновесной температуры, комбинация этих способов и закачивание ингибиторов непосредственно в пласт газового гидрата.

Таким образом, в зависимости от местоположения, структуры и типов месторождений газовых гидратов, на сегодняшний день теоретически существуют различные подходы к их разработке. Однако физика процесса извлечения газа основана на смещении фазового равновесия в сторону разложения залежи на газ и воду [20].

Учитывая актуальность использования нетрадиционных ресурсов для Украины, ученые Украинского геологоразведочного на протяжении ряда лет проводят исследования, связанные с разработкой способов добычи газа метана со дна

Черного моря. Проведен ряд экспериментов, на результатах которых базируются полученные патенты на новые технологии добычи.

Вторым не менее значительным ресурсом газа метана со дна Черного моря и по утверждению академика Губкина И.М. являющимся убедительным поисковым признаком есть газ из сипов и грязевых вулканов [14].

В 90-х годах XX столетия был организован ряд экспедиций, в которых принимали участие сотрудники объединения «Южморгеология» Ю.А. Бяков, Р.П. Кругляков [42], Е.Ф. Шнюков, В.П. Коболев [42, 41]. По результатам исследований Шнюкова Е.Ф. и Старостенко В.И., дно Черного моря представляет собой базальтовую плиту, которая покрывает мантию Земли. Под Черным морем строение земной коры напоминает океанское, но слой осадочных пород там более 10 км, то есть толще, а слой базальтов имеет толщину меньше, чем под материками, но больше, чем под океанами — 10—20 км. Рельеф центральной части Черного моря представлен абиссальной равниной, которая расположена на глубине 2 км. Шельфом моря является пологий подводный склон протяженностью 100—150 метров. За ним расположен континентальный склон с углом падения 20—30°, который представляет собой обрыв до глубин свыше 1 км.

Предполагается, что метан в Черном море может залегать в двух состояниях — свободном и гидратном. Что касается гидратного состояния, то метан в виде газогидратного пласта залегает в донных осадках, состоящих из песка и органики, на глубине примерно двух километров. В то время как свободный метан находится в так называемых «газовых ловушках», которые формируются в разуплотненных породах. Существует некоторая закономерность: выделение метана в виде факелов проявляется только по периферии Черного моря, в то время как в Черноморской впадине практически отсутствует [45].

По мнению Макогона Ю.Ф., важнейшей особенностью Черного моря является отсутствие накопления органики в донных осадках, что исключает генерацию углеводородов в толще придонных осадков. В работе [18] автор обращает внимание на то, что придонные воды далеки от насыщения метаном, что исключает процесс гидратообразования. Кроме того, процессы окисления метана в анаэробной толще воды и в придонных осадках превышают процессы генерации метана. Гидрат метана в виде микрокристаллов, образующихся на поверхности пузырьков газа, всплывает и достаточно быстро растворяется в толще воды. Количественные оценки наличия гидрата в толще придонных пород могут быть получены лишь через постановку специальных исследований, включая бурение, отбор и исследование кернов. С этим выводом автора [18] сложно не согласиться.

Таким образом, непосредственно для Черного моря, поскольку найдены и исследованы мелководные районы распространения газогидратов в придонной области в виде пластов, линз и образований в поровой среде, исследователями [12, 37] предлагается уделить внимание сбору свободно всплывающего газа на больших площадях вблизи морского дна. На практике подводная добыча газа может осуществляться из уже действующих источников: газовых факелов либо подводных вулканов [20].

Как один из способов непрерывного отбора газа из газовых факелов [5, 43] предполагает использование газоотборного зонда со встроенным шлангом, который с борта специализированного судна лебедкой спускается на морское дно

и устанавливается над газовым факелом при маневрировании судна. Собранный газ через гибкий рукав подается на судно, где установлен специальный блок, обеспечивающий влагоотделение, оценку интенсивности газовыделения и подачу газа в специальные емкости. Недостаток способа — невозможность активации источника с целью увеличения интенсивности газовыделения.

Наиболее эффективным может быть уже упомянутый выше способ добычи газа из придонных скоплений газовых гидратов [31]. Он включает размещение над скоплением газовых гидратов куполообразного газосборника, механическое разрушение находящейся под газосборником породы, содержащей газы гидраты, с одновременным ее разрыхлением и взмучиванием, сбор под куполом газосборника продуктов разрушения породы и разложения газовых гидратов, сепарацию и отвод из газосборника выделенного газа. Механическое разрушение породы производится с использованием бура, в частности шнекового, с подачей под купол воды, которую берут из верхних, наиболее теплых слоев водной толщи, что способствует разложению газогидратов. Недостаток способа заключается в обеспечении разработки лишь придонных залежей и только под куполом газосборника, тогда как глубина их залегания под морским дном, как показано, может составлять сотни метров, а протяженность залежей ? значительно превышать размеры купола.

Перечисленных выше недостатков лишена универсальная технологическая схема, определяющая возможность применения различных методов, в том числе комплексных, для добычи природного газа в указанных условиях [24]. В данном случае предложена новая технологическая схема для подводной разработки газогидратных месторождений, которая обеспечивает оперативное перемещение оборудования для добычи газа по площади месторождения, его разработку по всей толще гидратосодержащих пород, применение комплекса методов разложения газовых гидратов.

Известен ряд систем для сбора свободно всплывающего газа, которые включают газосборник, выполненный, как правило, в виде куполообразного гибкого полотна или жесткой пространственной конструкции, установленной на дне в месте свободного выхода газа и снабженной трубопроводом для передачи газа на поверхность (патенты США №№ 6192691, 6299256, E21B 43/00).

Известно устройство для сбора пузырьков газа, выделяющегося из газогидратного пласта, включающее выполненное в виде установленного на центральной колонне над газовыделяющим участком воронкообразного экрана (патенты РФ 2026964, 2066367. E21B 43/00). Через форсунки центральной трубы под высоким давлением в слой вводится теплая морская вода и шлам. Одновременно шлам и морская вода, обогащенная газогидратом, засасывается через отсосный короб в отстойник на платформе для отделения газа, который временно направляют в контейнер, выполненный в виде надуваемого шара (баллона). При необходимости газ сжижают и хранят в емкостях [20].

Предлагается способ добычи природного газа в открытом море (патент Украины UA 115636). Способ включает сбор газа из донных газовых факелов над газовыделяющими участками морского дна с помощью куполообразного газосборника. При этом транспортировка газа на поверхность моря выполняют трубопроводом. Каркас газосборника выполнен из пустотелых гибких трубок, которые перед погружением наполняют жидкостью с определенным удельным

весом. Перед эксплуатацией внутри трубок увеличивают давление, обеспечивая нужную устойчивую форму газосборника [27].

Так же разработаны еще несколько способов добычи природного газа в открытом море (патент Украины UA 109492 и патент Украины UA 109790). Особенность конструкции состоит в том, что сбор газа из газовых факелов над участками морского дна осуществляется с помощью куполообразного газосборника, который находится в морской среде, при этом обеспечивая передачу газа из газосборника в буферную аккумуляционную емкость. Для отгрузки ее содержания на судно-сборщик в качестве аккумулятора используется куполообразная емкость. Она обладающая плавучестью и открыта снизу, а сверху соединена с выводным трубопроводом [25, 26].

Недостатком таких способов является низкая производительность и повышенные энергозатраты. Низкая производительность методов с применением эрлифта вызвана тем, что принцип эрлифта, применяемый на больших глубинах малоэффективен. Также, при таком подходе будут большие потери газа и весьма ощутимое воздействие на экосистему морского дна.

Повышенная энергозатратность обусловлена тем фактором, что транспортировка газа из «подкупольного» пространства газосборника осуществляется по трубопроводу в условиях термодинамической нестабильности всплывающего газа. В таких условиях возможен обратный процесс перехода его в гидратное состояние (твердую фазу) и закупорка каналов отвода газа, что требует дополнительной чистки или введения средств, предотвращающих повторное образование гидратов в трубопроводе. Этот процесс известен по эксплуатации наземных газопроводов.

Между тем окончательные выводы можно делать только после проведения как специальных лабораторных исследований на макетах разрабатываемых систем, так и в реальных условиях эксплуатации на местности.

Выводы

1. Существуют основные четыре принципиальных подхода к добыче газа из природных залежей газовых гидратов, это: снижение давления ниже условия фазового равновесия, нагрев гидратосодержащих пород выше равновесной температуры, комбинация этих способов и закачивание ингибиторов непосредственно в пласт газового гидрата

2. Непосредственно для Черного моря предлагается уделить внимание сбору свободно всплывающего газа на больших площадях вблизи морского дна.

3. Недостатком всех известных методов разработки газа метана из глубоководных месторождений газогидратов является низкая производительность, высокие энергозатраты и возможное негативное влияние на экосистему

4. Окончательные выводы можно делать только после проведения как специальных лабораторных исследований на макетах разрабатываемых систем, так и в реальных условиях эксплуатации на местности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитический центр при правительстве РФ. URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/1437>
2. Банк патентов. URL: <http://bankpatentov.ru/node/340861.htm>.

3. Басниев К.С., Кульчицкий В.В., Шебетов А.В., Нифантова А.В. Способы разработки газогидратных месторождений. *Газ. пром-сть*. 2006. № 7. С.22—24.
4. Басниев К.С., Шебетов А.В., Назаретова А.А. и др. Способы добычи газа из газогидратных месторождений. *Газ. пром-сть*. 2007. № 11. С. 84—86.
5. Бондаренко В.И., Ганушевич К.А., Сай Е.С. К вопросу скважинной подземной разработки газовых гидратов. *Науковий вісник НГУ*. 2011. Т. 1. С. 60—66.
6. Бяков Ю.А., Кругляков Р.П. Газогидраты осадочной толщи Черного моря — углеводородное сырье будущего. *Разведка и охрана недр*. 2001. № 8. С.14—18.
7. Власов С. Ф., Бабенко В. Э. Обоснование способа добычи газа из газогидратных залежей Черного моря. *Сборник научных трудов*. Дніпро: НГУ, 2017. № 52. С. 57—65.
8. Воробьев А.Е., Янкевский А.В., Голубченко М.В. Обзор мировой технологии добычи газа из газовых гидратов. *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. 2015. С. 90—94.
9. Воробьев А.Е., Капитонова И.Л. Основы добычи аквальных газовых гидратов. *Учебное пособие*. Москва. Российский университет дружбы народов. 2014. 106 с.
10. Воронов В.П., Городецкий Е.Е., Муратов А.Р., Сафонов С.С. Экспериментальное исследование процесса замещения метана в газовом гидрате углекислым газом. *Докл. АН*. 2009. Т. 429, № 2. С.257—259.
11. Газогидраты: технологии добычи и перспективы разработки. *Информационная справка. Дирекция по стратегическим исследованиям в энергетике*. М.: 2013. 22 с.
12. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. Санкт-Петербург: *ВНИИОкеангеология*, 1998. 216 с.
13. Гошовский С.В., Зурьян А.В. Газогидратные залежи: формирование, разведка и освоение. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2017. № 4/50. С. 65—78.
14. Губкин И.М. Грязевые вулканы Советского Союза и их связь с генезисом нефтяных месторождений Крымско-Кавказской геологической провинции. *Тр. 17 Междунар. геол. конгр.*, 1940. Т. 4. С. 33—66.
15. Жуков А.В., Звонарев М.И., Жукова Ю.А. Способ добычи газа из глубоководных месторождений газогидратов *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. Москва. №10, 2013 С. 16—20.
16. Кунсбаева Г.А. «Шахтный» способ добычи газа из подводных газогидратных массивов. *Трибуна молодого ученого. Актуальные проблемы науки глазами молодежи: материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов с междунар. участием*. Мурманск. 16—19 апр. 2012. Т.2. Мурманск: МГТУ, 2012. С. 17—18.
17. Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы. *Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева*. 2003. т. XLVII, №3. С. 70—79.
18. Макогон Ю.Ф. Газогидраты, история изучения. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2010. № 2. С. 5—21.
19. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М.: Недра, 1974. 208 с.
20. Максимова Э.А. Разработка месторождений газовых гидратов на основе теплового воздействия на залежь. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Випуск 2/2015 (91) С. 90—95.
21. Максимова Э.А. Принцип выбора схемы разработки природных месторождений газовых гидратов на основе анализа процессов теплопереноса. *Науково-технічний збірник «Розробка родовищ»*. НГУ. 2015. С.275—281.
22. Максимова Э.А. Типы месторождений газовых гидратов и их учет при подземной разработке. *Сборник научных трудов Донбасского государственного университета*. Алчевск: ДонГТУ, 2013. Вып. 40. С. 65—69.
23. Матвеева Т.В. Способ добычи газа из придонных субаквальных скоплений газовых гидратов. *Горн. журн.* 2012. N 3. С.81—85.
24. Пат. 100522 Україна, МПК E21B 43/01. Універсальний спосіб підводного видобутку газу зі скупчень газових гідратів в осадовій товщі / Б.М. Васюк. Заявл. 27.02.2015; Опубл. 27.07.2015, Бюл. №14
25. Пат. 109492 Україна, МПК E21B 43/01. Спосіб видобутку природного газу у відкритому морі / С.В. Гошовський та ін. Заявл. 03.03.2016; Опубл. 22.08.2016, Бюл. № 16.

26. Пат. 109790 Україна, МПК E21B 43/01. Спосіб видобутку природного газу у відкритому морі / С.В. Гошовський та ін. Заявл. 22.02.2016; Опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17.
27. Пат. 115636 Україна, МПК E21B 43/01. Спосіб видобування газу у відкритому морі / С.В. Гошовський та ін. Заявл. 21.11.2016; Опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22.
28. Пат. 2370642 РФ, МПК E21B 43/22. Добыча свободного газа конверсией газового гидрата/ Арне Грзуэ и др. Заявл. 16.09.2005; Опубл. 20.10.2009.
29. Пат. 65280 Україна, МПК E21B 43/00. Спосіб добування газу метану з морських газогідратних родовищ/ В.І. Бондаренко та ін. Заявл. 05.07.2011; Опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.
30. Пат. 82371 Україна, МПК E21B 43/16; 43/25. Спосіб локального спрямованого гідророзриву пласта/ Б.М. Васюк. Заявл. 07.03.2013; Опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14.
31. Пат. РФ 2403379, МПК E21B 43/01. Способ добычи газа из придонных скоплений газовых гидратов / Т.В. Матвеева, В.А. Соловьев, Л.Л. Мазуренко. Заявл. 24.06.2009; Опубл. 10.11.2010; Бюл. № 31.
32. Патенты России. URL: <http://ru-patent.info/21/6569/2169834.html> 37
33. Реестр российских патентов. URL: <http://bd.patent.su/2370000-2370999/pat/servlet/servletc97d.html>
34. Решетников А.А., Голованчиков А.Б. Образование газогидратов и способы их добычи. *Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. Сер. Геология, процессы и аппараты хим. технологии*. 2010. Вып. 3. С. 5—7.
35. Тохиди Б., Архманди М., Андерсон Р., Ян Ц. Исследования низкокодизируемых ингибиторов гидратов в университете Хэриот-Ватт. *Наука и техника в газовой пром-сти*. 2004. № 1—2. С. 81—89.
36. Трофимук А.А., Черский Н.В., Царев В.П. Газогидраты — новые источники углеводородов. *Природа*. 1979. № 1. С. 18—27.
37. Чжан Ю. Извлечение метана из газовых гидратов в морской среде путем пузырьковых извержений (англ.). *Геофизический научный сборник геологического Департамента Мичиганского университета*. Мичиган, США, 2003. Т. 30, № 7. С. 511—14.
38. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Сыртланов В.Р. О возможности вымывания газа из газогидратного массива циркуляцией теплой воды. *Теплофизика, гидродинамика, теплотехника*: сб. ст. Вып. 4. Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. ун-та, 2008. С.151—161.
39. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. Особенности разложения газовых гидратов в пористых средах при нагнетании теплого газа. *Теплофизика и аэромеханика*. 2013. Т. 20, № 3(81). С. 347—354.
40. Шагапов В.Ш., Сыртланов В.Р. Диссоциация газовых гидратов в пористой среде при депрессии и нагреве поверхностными и объемными источниками тепла. *Нефть и газ Зап. Сибири: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф.*, 21—23 мая 1996. Тюмень, 1996. Т.2. С.71—72.
41. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А. Газовый вулканизм Черного моря. К.: Логос, 2013. 384 с.
42. Шнюков Е.Ф., Зиборов А.П. Гидраты природных газов — К.: *Наук. думка*, 2004. 280 с.
43. Шнюков Е.Ф., Зиборов А.П. Минеральные богатства Черного моря. К.: *ОМГОР НАН Украины*, 2004. 280 с.
44. Якуцени В.П. Газогидраты — нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и геологические ресурсы. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2013. Т.8, №4. С. 1—24.
45. Goshovskiy S. V., Likhosherstov O.O. Generalization of geological information about the areas of gas seeps at the north-western part of the Black Sea. *XIY International conference of the open and underwater mining of mineral*, 03—07 august, 2017, Varna, Bulgaria. Scientific and technical union of mining, geology and metallurgy 2017. P. 26 —30.
46. Sloan E. Dendy, Dekker Jr. Marcel. Clathrate Hydrates of Natural Gases, 2nd ed., *Revised and Expanded. Chemical Industries Series/73*, Inc.: New York. 1998. 754 pages.

Статья поступила 18.03.2018

С.В. Гошовський, О.В. Зур'ян

РОЗРОБКА ГАЗУ МЕТАНУ З СИПІВ,
ГРЯЗЬОВИХ ВУЛКАНІВ І МОРСЬКИХ РОДОВИЩ ГАЗОГІДРАТІВ

Приведено теоретичний аналіз особливостей розробки газу метану з глибоководних газогідратних покладів. Систематизовано засоби та технології видобутку газу метану з газогідратних формувань, сипів та грязьових вулканів. Надана класифікація способів видобутку метану з природних газогідратів.

Ключові слова: газогідрати, нетрадиційне джерело вуглеводневої сировини, газові родовища, метаногідрати, сипи, грязьові вулкани, технології видобутку, Чорне море.

S.V. Goshovskyi, A.V. Zurian

GAS METHANE RECOVERY FROM SIPS,
MUD VOLCANOES, AND MARINE FIELDS OF GAS HYDRATE

Theoretical analysis of peculiarities of gas methane development from great depth gas hydrate deposits is presented. Methods and technologies of gas methane recovery from gas hydrate accumulations were systemized. Classification of methane development methods from nature gas hydrate is given.

Keywords: gas hydrate, unconventional source of hydrocarbons, gas fields, methane hydrates, sips, mud volcanoes, production technology, the Black Sea.