
С.В. Гошовский, А.В. Зурьян

Украинский государственный геологоразведочный институт, Киев

ГАЗОГИДРАТНЫЕ ЗАЛЕЖИ: ФОРМИРОВАНИЕ, РАЗВЕДКА И ОСВОЕНИЕ

Изложен краткий обзор научных работ, посвященных истории открытия природных газогидратов, изучению их характеристик, условий формирования, способов выявления и разведки, а также решению потенциальных экологических проблем разработки газогидратов.

Ключевые слова: газогидраты, метаногидраты, сипы, грязевые вулканы, Черное море.

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. Некоторые из них, такие как газы угольных месторождений, исследуются и осваиваются уже давно. Добыча нетрадиционного газа из других значимых его источников – низкопроницаемых коллекторов и сланцевых формаций – в значимых масштабах осуществляется пока только в США. Это связано с высокой стоимостью технологий освоения этих ресурсов и негативными экологическими последствиями для территорий их освоения. Одновременно расширились исследования газогидратов, которым принадлежат самые крупные потенциальные ресурсы среди нетрадиционных ресурсов газа, но при этом их общая изученность одна из самых низких среди нетрадиционных видов газового сырья [63].

По оценкам экспертов [6, 10, 16, 17, 19, 21–24, 27, 34, 37, 40, 43, 47, 53, 64–66] запасы газогидратов в мире на порядок превышают запасы конвенционального природного газа.

Колоссальные запасы метана, сосредоточенные в газогидратах (метаногидратах) – кристаллических образованиях из воды и ме-

© С.В. ГОШОВСКИЙ, А.В. ЗУРЬЯН, 2017

тана — и принципиальная возможность их извлечения в промышленном масштабе привлекают к себе внимание правительств, частных компаний, университетов и лабораторий во многих частях мира [1].

История изучения газовых гидратов началась в XVIII веке с получения Дж. Пристли, Б. Пелетье, Г. Дэви и В. Карстеном гидратов сернистого газа и хлора, составы которых были определены в начале XIX века А. Деляривом и М. Фарадеем. В первой половине XX века фундаментальные исследования свойств техногенных и искусственных гидратов проводили Е. Гаммершмидт, У. Дитон, Е. Фрост, Д. Катц, Р. Кобаяши. Кристаллическую структуру клатратов многих газов определили М. Штакельберг, Г. Мюллер и Л. Полинг [13].

В течение более чем 235 лет исследований газогидратов интерес к ним рос по мере понимания их особой значимости для человечества. Так, если за период с 1778 по 1934 гг. по газогидратам было опубликовано всего 56 работ (причем исключительно академического плана), то с 1935 по 1965 гг. опубликовано 144 работы (к тому же в основном в области промышленного применения газогидратов), а с 1965 г. по настоящее время — уже более 7600 работ. Причем, суммарное количество полученных с 1940 г. авторских свидетельств и патентов на изобретения по гидратной проблематике превысило 500 [29].

На рубеже XIX–XX веков были открыты гидраты различных веществ, в том числе метана, этана, пропана и других компонентов природного газа, а также обнаружена возможность существования двойных гидратов — структур, в состав которых входят молекулы двух веществ-гидратообразователей. Помимо этого, были предложены методы прямого и полуэмпирического расчётного определения состава гидратов. В целом, до первой половины двадцатого века основным направлением исследований являлось выявление веществ, которые могут образовывать гидраты, и определение термобарических условий их образования.

В 1930 году Е.Г. Хаммершмидт сделал вывод, что именно гидрат был ответственен за аварии на трубопроводах природного газа, особенно расположенных в окружающей среде с отрицательными температурами. Впоследствии небольшая группа исследователей во главе с доктором Д. Слоаном в Колорадской Школе Шахт исследовала физику различных клатратов и разработала первые прогнозирующие модели их формирования. Главным направлением этой работы было (и остается) развитие различных методов, предотвращающих формирование гидрата, а также поиск химических добавок, ингибирующих процесс гидратообразования [50].

Следующий этап развития исследований газовых гидратов приходится на 1940-е годы и связан с высказыванием советскими учёными гипотезы о наличии залежей газовых гидратов в зоне вечной мерзлоты.

В прошлом столетии теоретическими и экспериментальными исследованиями свойств газовых гидратов в СССР занимались: Г.А. Саркисянц, И.Е. Ходанович, П.А. Теснер, Б.В. Дегтярев, Э.Б. Бухгалтер, Г.В. Пономарев, С.Ш. Бык, В.И. Фомина, Ю.П. Коротаев, А.Г. Гройсман, Д.Ю. Ступин, Э.В. Маленко, Р.М. Мусаев и др.

Выдающийся вклад в решение проблемы существования газогидратов в природных условиях внесли И.П. Стрижов, Ф.А. Требин, Ю.Ф. Макогон, А.А. Трофимук, И.В. Черский, В.Г. Васильев.

Возможность существования газогидратных залежей в природных условиях была показана работами И.Н. Стрижова (1946 г.), М.П. Мохнаткина (1947 г.). В 1960-е годы они же обнаруживают первые месторождения газовых гидратов на севере СССР. Одновременно с этим возможность образования и существования гидратов в природных условиях находит подтверждение на основе экспериментальных исследований Ю.Ф. Макогона, выполненных на кафедре разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. Научное открытие возможности существования природных газогидратов было зарегистрировано в Государственном реестре научных открытий СССР (№75, 1970 г.). Авторы открытия – Ю.Ф. Макогон, Ф.А. Требин, В.Г. Васильев, Н.В. Черский, А.А. Трофимук. С тех пор были развёрнуты широкомасштабные исследования проблемы существования природных газогидратов [7].

Первые успешные поиски гидратосодержащих пород в природе провели сотрудники ВНИИГАЗа А.Г. Ефремова и Б.П. Жижченко при донном пробоотборе в глубоководной части Черного моря в 1972 году. Они визуально наблюдали вкрапления гидратов, похожие на иней, в кавернах извлеченного со дна грунта.

В Украине еще в 1993 году была принята программа «Газогидраты Черного моря», в соответствии с которой были начаты геологические исследования и работы по созданию конструкции и технологии для извлечения газа из метаногидратов, но, к сожалению, по разным причинам она не была реализована. В настоящее время ведущим предприятием, которое занимается проблемами природных газовых гидратов Черного моря, является Государственное научное учреждение «Отделение морской геологии и осадочного рудообразования» НАН Украины ОМГОР НАНУ под руководством академика НАН Украины Евгения Федоровича Шнюкова. Среди украинских специалистов, активно работающих в этой области, следует отметить: ОМГОР НАНУ (Е.Ф. Шнюкова, Л.В. Ступину, Е.Н. Рыбак, А.А. Парышева, Ю.И. Иноземцева, Н.А. Маслакова), «Южморгеология» (Р.П. Круглякову, В.М. Андреева, И.Н. Гусакова), «Причерноморгеология» (Е.Я. Нетребскую), Институт геофизики им. Субботина НАНУ (В.П. Коболева, В.И. Старостенко, С.Ф. Михайлюка), УкрГГРИ (С.В. Гошовского, П.Т. Сиротенко, А.А. Лихошерстова А.В. Зурьяна), Институт геологических наук НАНУ, Полтавский национальный горный университет им. Юрия Кондратюка, Институт газа НАНУ, Национальный горный университет, Кировоградский национальный технический университет, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова и другие.

В Черном море газогидраты обнаружены на глубинах 300–800 м, где под поверхностью морского дна располагается пласт 300–1200 м. Количество содержащегося в нем метана оценивается в 100 трлн м³. Установлено, что газогидратные отложения, начиная с 550–600 м, по всему периметру Черного моря загазованы метаном и проявляются в форме сипов, фонтанов, грязевых вулканов. Это уникальное явление на земном шаре, так как ни в одном море в мире такого активного выделения метана не установлено. На дне Черного и Азовского морей широко развиты грязевые вулканы, которые из глубины недр при достижении высоких давлений (300–400 атм.) по разломам вверх выбрасывают воду, глины, обломки твердых пород с образованием на дне грязевых сопков. В глубоководной части Черного моря имеются условия для образования газогидратов – низкие

температуры придонного слоя, необходимые давления, чередование глинистых и пористых отложений, аномальность газонасыщенности и др. [59].

Газогидраты выявлены почти на 50 площадях мира. По некоторым оценкам 98% ресурсов газогидратного газа присутствует на морских континентальных окраинах и 2% – в районах вечной мерзлоты на суше [2, 76]. Данные исследований арктических газогидратов свидетельствуют о том, что в регионах вечной мерзлоты они могут существовать на глубинах от 130 до 2000 м от поверхности. Примерно 10% площади Мирового океана являются потенциально газогидратоносными. Глубоководным бурением газогидраты были вскрыты юго-восточнее и западнее США, вблизи Канады, Перу, Коста-Рики, Гватемалы и Мексики, у берегов Японии, в Мексиканском заливе. Они обнаружены также в Средиземном, Черном, Каспийском, Южно-Китайском морях, а также у берегов Калифорнии, Южной Кореи, Индии и в других местах.

Вопросам моделей образования газогидратов посвящены труды [20, 33, 39, 45, 48, 52, 57].

Существуют две гипотезы объяснения происхождения аквамариновых газовых гидратов [7]: органическая и неорганическая. Согласно первой, источником метана в газовых гидратах являются процессы разложения органического вещества осадочных пород и генерация CH_4 микроорганизмами в поддонных отложениях, а второй – поступление к поверхности глубинных углеводородных газов, в том числе тех, которые образуются в процессах серпентизации океанической коры.

Результаты анализа газогидратов показывают, что их состав отличается от состава газов биохимического происхождения. В биохимических газах преобладает метан, а примесь его гомологов и их производных составляет тысячные и десятитысячные доли процентов, в то время как в смеси газогидратов отмечается высокое содержание гомологов метана и его производных [42].

Возможность формирования крупных газогидратных залежей за счёт «биогаза» в Чёрном море исключается в силу того, что суммарное содержание органического углерода в осадках не превышает 0,3 %, чего недостаточно для формирования даже одной залежи в прикрымской части Черного моря, для которой подсчитанные извлекаемые запасы метана составляют 7,0–7,7 трлн м^3 . [9]. Рассматривается также модель формирования газогидратов за счёт разгрузки глубинных газовых или нефтяных месторождений. Однако продукты их дегазации резко различаются по составу от продуктов разложения газогидратных залежей более высоким содержанием газообразных соединений азота, присутствием водорода, кислорода в атомарной форме. Против этой теории свидетельствует также полиминеральный состав «курильщиков», т. к. при разгрузке нефтяных и газовых месторождений не наблюдается выход высокоминерализованной фазы [9].

Существует еще одна гипотеза происхождения аквамариновых газовых гидратов, основанная на новой «биосферной» концепции формирования скоплений углеводородов [3], связывающей их образование с переносом углерода через земную поверхность при его геохимическом круговороте.

В основу этой концепции положена идея В.И. Вернадского о глобальном геохимическом круговороте вещества, в котором активное участие принимают живые организмы.

Однако, данная гипотеза имеет некие противоречия, заключающиеся в расхождении результатов оценки времени жизни скоплений газогидратов [4].

Таким образом «неорганики» основным считают первый цикл, «органики» – второй, а наиболее быстрый биосферный цикл не принимается во внимание вообще.

Процесс образования газовых гидратов представляет собой одновременную фиксацию свободно перемещающихся молекул газа, гидратообразователя и воды.

Газовые гидраты образуются при низкой температуре и высоком давлении (при условии достаточного количества гидратообразующего вещества и воды). При образовании гидратной структуры удельный объем газа резко снижается, происходит его сжатие от внешнего давления гидратообразования до давления газа в гидратном состоянии [50].

В природных условиях газовые гидраты могут образовываться в донных отложениях морей и океанов, а также в криолитозоне при наличии зон стабильности газогидратов – участков в разрезе земной коры, термобарический и геохимический режим которых соответствует условиям устойчивого существования гидратов природных газов определенного состава.

В криолитозоне предпосылкой к формированию условий гидратообразования является длительное и глубокое охлаждение пород [46].

Метан является наиболее распространенным газом, образующим природные газовые гидраты. Кроме метана, в состав природных газогидратов могут входить другие углеводороды (этан, пропан, бутан), а также такие газы, как CO_2 и SO_2 .

Месторождения гидратов метана встречаются в виде рассеянных крупинки или тонких пластов. Постоянным спутником и источником образования гидратов метана является так называемый «свободный газ» (Free Gas), который находится под их залежами.

Устойчивость состояния океанических гидратов метана зависит не только от величины давления (глубины залегания) и окружающей температуры, но также от уровня концентрации или растворимости метана в морских отложениях

Давление и температура, необходимые для устойчивого существования в природе метаногидрата, встречаются в районах вечной мерзлоты и на дне океана.

На континентах также существуют условия для образования газогидратов. Однако в континентальных породах меньше воды и меньше порового пространства, в котором формируются газогидраты. Кроме того, температура пород при тех же давлениях намного выше, чем в осадках океанов и морей, в связи с наличием геотермического градиента – роста температуры на 2–3°С с каждой сотней метров глубины.

Метаногидраты могут довольно долго существовать в условиях низких давлений и при более высокой температуре, но обязательно отрицательной – в этом случае они находятся в метастабильном состоянии, их существование обеспечивает эффект самоконсервации – при разложении метаногидраты покрываются ледяной коркой, что мешает дальнейшему разложению [7].

Существующие технологии обнаружения газогидратных месторождений описаны в работах [8, 11, 12, 14, 32, 38, 44], они опираются на использование свойств гидратов и гидратонасыщенных пород (таких как высокая акустическая проводимость, высокое электрическое сопротивление, пониженная плотность, низкая теплопроводимость, низкая проницаемость для газа и воды). К методам обнаружения газогидратных залежей относят: «сейсмическое зондирование, гра-

виметрический метод, измерение теплового и диффузного потоков над залежью, изучение динамики электромагнитного поля в исследуемом регионе и др.» [32]. На сегодняшний день эти методы активно развиваются и совершенствуются.

Наиболее распространенным методом обнаружения газогидратных месторождений является стандартная и высокочастотная сейсмическая разведка. По данным двухмерной (2-D) сейсморазведки при наличии свободного газа под гидратонасыщенным пластом определяется нижнее положение гидратонасыщенных пород. Более качественные результаты дает метод высокого разрешения трехмерной (3-D) сейсморазведки: он позволяет определить верхнюю и нижнюю границу гидратонасыщенных пород, а также концентрацию гидрата в породах. Данные сейсмического зондирования дополняются с помощью других методов анализа. Верными источниками дополнительной информации служат геофизические исследования пробуренных скважин, а также отбор и комплексный анализ образцов горной породы, извлеченной из скважины непосредственно на месторождении.

Наиболее чувствительным к обнаружению газогидратов является геофизический метод, однако его использование сопряжено с большими, чем при сейсморазведке, техническими трудностями. Наиболее передовым является комплексный анализ. Он включает в себя изучение осадочных пород, анализ каротажной диаграммы, качественную и количественную интерпретацию данных сейсморазведки и анализ других данных о нефтегазовой системе.

Перспективным дополнением к сейсморазведке для неразрушающего обнаружения газогидратов в пористых породах является электромагнитная разведка [8].

Грязевые вулканы — это прямые поисковые признаки на нефть и газ [12]. А поскольку почти в половине глубоководных грязевых вулканов обгажены газогидраты метана, то это позволяет рассматривать их и как поисковый признак на залежи газогидратов метана. В условиях проведения исследований на море важнейшим критерием выявления вулканов есть геофизические, в первую очередь сейсмические, исследования. На сейсмических профилях грязевые вулканы видны наглядно. Сейсмика позволяет фиксировать не только факт существования вулкана, но и глубинные корни его залегания. Одним из основных методов подводных исследований является гидролокация бокового обзора (ГЛБО). Многие из известных к настоящему времени грязевых вулканов открыты с помощью ГЛБО [12].

В настоящее время в мире открыто уже более 220 месторождений газогидратов. Они выявлены вблизи берегов США, Канады, Коста-Рики, Гватемалы, Мексики, Японии, Южной Кореи, Индии и Китая, а также в Средиземном, Черном, Каспийском, Южно-Китайском морях. Ожидается, что значительные запасы газогидратов могут находиться в Аравийском море, вблизи западного побережья Африки, у берегов Перу и Бангладеш [8].

Разработка газогидратных месторождений традиционными методами нефтегазовой промышленности вызывает затруднения. Существующие методы [5, 17, 26, 31, 35, 38, 49, 54–56, 61] опираются на диссоциацию (разделение), при которой газогидраты распадаются на газ и воду. Три основных метода разработки залежей газогидратов включают: разгерметизацию (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.

Разгерметизация – наиболее 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 за счет уменьшения 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.

Технология нагревания имеет несколько видов. 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 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, 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 бромиды 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 самоподдерживающемся 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 [8].

На сегодняшний день только небольшое число газогидратных скоплений изучено более-менее детально. Это прежде всего скопления газогидратов на хребте Блейк вдоль юго-восточной атлантической континентальной окраины США, на площадях вдоль континентальной окраины Каскадия (тихоокеанская окраина Канады), в прогибе Нанкай у восточного побережья Японии, на Северном склоне Аляски, в дельте реки Маккензи (Канада).

По оценкам, выполненным разными учеными в разное время, общее количество природного газа в газогидратных скоплениях мира громадное. Однако эти оценки варьируют в широких пределах: от 14 до 34000 триллионов м³ в зонах вечной мерзлоты на суше и от 3100 до 7600000 триллионов м³ на акваториях [70, 71].

Количество метана в газогидратных скоплениях мира ориентировочно составляет порядка 20000 триллионов м³. Если эти оценки достоверны, то это означает, что количество метана в газогидратах мира почти на два порядка больше, чем остающиеся извлекаемые ресурсы традиционного природного газа (250 триллионов м³) [2]. По оценкам Газового исследовательского института США (2003) геологические ресурсы газа в газогидратных скоплениях США составляют 9056 триллионов м³ и, если удастся извлечь хотя бы 1% газа из этих скоплений, потребности США в газе будут удовлетворяться на протяжении 100 лет. [2, 77]. США рассматривают эти ресурсы как стратегический резерв, который позволит обеспечить энергетическую безопасность страны в будущем. Национальная оценка ресурсов нефти и газа, выполненная Геологической службой США в 1995 г., впервые включала оценку геологических ресурсов природных газогидратов на суше и на акваториях США. В пределах четырех морских и одной сухопутной (Северный склон Аляски) газогидратной провинции было выявлено одиннадцать газогидратных плеев. По данным Департамента энергии США газогидраты на Северном склоне Аляски могут содержать порядка 16,7 триллионов м³ газа, т. е. намного больше ресурсов традиционного газа в этом регионе.

Прогнозные ресурсы газа в газогидратах Индии оцениваются в 1894 триллионов м³, то есть в 1700 раз больше доказанных запасов природного газа в стране (1,08 триллионов м³) [78]; около 55 триллионов м³ прогнозных ресурсов установлено у восточного побережья Индии [75].

По данным компании NRC, канадские газогидраты содержат 45-800 триллионов м³ газа [79]

В последние годы Япония, Китай, США и Индия приступили к выполнению амбициозных национальных программ по дальнейшему изучению потенциала газогидратов.

В настоящее время в США проводятся исследования по выявлению и изучению газогидратов в глубоководных областях Мексиканского залива.

Индия создала национальную научно-исследовательскую программу по изучению подводных газогидратов. В настоящее время главным объектом исследований является глубоководная часть бассейна Кришна-Годавари [81].

Насколько можно судить из сообщений в открытых источниках, лидеры уже наметились — это Япония и Китай. С 1995 г. Правительство Японии проводит масштабные сейсморазведочные работы в Тихом океане в прогиге Нанкай. Было выполнено две программы, а в 2009 г. в рамках третьей (стоимостью в \$500 млн) началась подготовка пилотного проекта по добыче газогидратов. С этой целью в 2012 г. в 50 км к востоку от острова Хонсю началось бурение опытно-эксплуатационной скважины. 12 марта 2013 г. стартовала первая опытная добыча метана из подводных залежей газогидратов. За шесть дней было извлечено 120 тыс. м³ газа. Япония планирует к 2018 г. усовершенствовать технологию добычи и приступить к промышленной полномасштабной эксплуатации газогидратных залежей. Таким образом, в гонке за новым источником энергии лидерство до последнего времени принадлежало Японии [58]. 18 мая 2017 г. в мировых СМИ появилось сенсационное сообщение об успешной добыче китайскими нефтяниками «горючего льда» на площади Шенху (Shenhu) в Южно-Китайском море. В сообщении Центрального телевидения Китая (ЦТК) отмечается, что в других странах попытки наладить бесперебойную добычу газогидратов со дна моря по разным причинам не привели к успеху, поэтому достижение китайских специалистов можно отнести к достижениям «высшего мирового уровня». «Первая успешная демонстрация означает, что освоение месторождений «горючего льда» вступило в новую фазу развития и может изменить ситуацию в глобальной отрасли добычи энергоресурсов», — подчеркивается в сообщении ЦТК. Вместе с тем никаких данных, по которым можно было бы сделать хоть какие-то выводы о перспективах этой технологии, не опубликовано и пока неизвестно. [67]. Известно только, что Китай планирует в следующем десятилетии направить 100 миллионов долларов на газогидратные исследования [81].

По прогнозам зарубежных ученых значительной добычи газа из газогидратов в ближайшие годы не будет. Однако в некоторых развитых странах, обладающих небольшими традиционными энергетическими ресурсами, например, таких, как Япония, а также в странах с уникальными местными экономическими условиями, например с расположением газогидратных скоплений вблизи скоплений традиционных энергетических ресурсов (Северный склон Аляски), газогидраты могут стать источником природного газа уже в следующие 5–10 лет. Появление на мировом рынке гидратного газа может значительно изменить общую ситуацию с газовыми потоками в мире [2].

Одной из важных составляющих планируемой многими странами разработки залежей метаногидратов является создание экологически безопасных технологий добычи натурального газа. Основной подход к решению этой проблемы сформирован в работах [15, 22, 25, 30, 36, 41, 51, 62]. С точки зрения экологии, основную опасность представляет нарушение механической прочности, содержащих газогидраты пород, вызванное отбором метана. Это может привести к уплотнению пород под действием вышележащих отложений и, как следствие, к возникновению провалов или оползней, что особенно опасно на склонах континентальных шельфов. Предотвращение таких сценариев при разработке метаногидратов может обеспечить технология, базирующаяся на замещении метаногидрата гидратом двуокиси углерода [68, 69, 80].

В силу узкого диапазона температуры и давления, при котором обеспечивается термодинамическая стабильность метаногидратов, незначительные наруше-

ния этих условий, а также механические воздействия на залежь могут привести к спонтанному выделению метана из газогидратов в атмосферу или в водную среду. Выделение метана в атмосферу увеличивает парниковый эффект, причем в 20 раз сильнее, чем углекислый газ. Увеличение концентрации метана в воде океанов и морей может повлиять на экосистему бассейнов. В связи с этим ряд лабораторий США, спонсируемых правительственными организациями, изучают естественные причины, способные нарушить стабильность газогидратов и, как следствие, обусловить выделение метана. В рамках этих исследований разрабатываются системы мониторинга содержания метана в атмосфере и водных бассейнах [74, 80]. Бурение и эксплуатация залежей газогидратов на больших площадях тоже может в какой-то степени дестабилизировать газогидраты и привести к выделению метана. Пока этот вопрос еще детально не изучен. При проведении пробной промышленной разработки месторождений газогидратов, бурения или иных операций, по-видимому, потребуются организовать контроль содержания метана в атмосфере и воде. Разработка месторождений метаногидратов в определенной степени пересекается с проблемой уменьшения содержания углекислого газа в атмосфере. Одним из вариантов решения этой проблемы является закачка в недра углекислого газа, выделяемого промышленными предприятиями, в частности тепловыми электростанциями. Когда добыча метана из газогидратов перейдет из стадии опытных работ в стадию промышленной эксплуатации, технология разработки метаногидратов путем введения в пласты двуокиси углерода сможет частично способствовать решению этих экологических проблем [1].

Вывод. Газогидраты представляют перспективный источник углеводородных энергетических ресурсов и в будущем могут составить реальную конкуренцию традиционным газовым месторождениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксельрот С.М. Разработка залежей метаногидратов методом замещения метана углекислым газом / С.М. Аксельрот. *Научно-технический вестник «Каротажник»*. Тверь. 2014. Выпуск 8 (242). С. 70–102.
2. Анфилова А.Э. Аналитический обзор современных зарубежных данных по проблеме распространения газогидратов в акваториях мира. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2008. URL: http://www.ngtp.ru/rub/9/44_2008.pdf.
3. Баренбаум А.А. Происхождение аквамаринных газогидратов в биосферной концепции нефтегазообразования. Источник метана и среднее время жизни газогидратов в скоплениях. Материалы Междунар. Конф. «Перспективы освоения ресурсов газогидратных месторождений». РГУ Нефти и Газа им. И.М. Губкина. (17-18 ноября 2009 г.) Москва, 2009. С 57–59
4. Баренбаум А. А. О возможной связи газогидратов с субмаринными подземными водами. *Водные ресурсы*. 2007. **34**, № 4. С. 1–6.
5. Басниев К.С., Щебетов В., Назаретова А.А. и др. Способы добычи газа из газогидратных месторождений. *Газ. пром-сть*. 2007. № 11. С. 84–86.
6. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. Энергетика в экономике XXI века. М.: ИздАт. 2010. 176 с.
7. Воробьев А.Е., Капитонова И.Л. Основы добычи аквальных газовых гидратов. Учебное пособие. Москва. Росс. универ. дружбы народов. 2014. 106 с.
8. Газогидраты: технологии добычи и перспективы разработки. Информационная справка. Дирекция по стратегическим исследованиям в энергетике. М.: 2013. 22 с.
9. Геворкьян В. Х., Сокур О. Н. Газогидраты – продукт мантийной дегазации. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2012. – № 1. С. 52– 65.

10. Гошовский С.В. Метановые сипы и газовые гидраты Черного моря – нетрадиционные углеводороды черного моря. *Газогидратные технологии в горном, нефтегазовом деле, геотехнике и энергетике* : тез. докл. II Междунар. н.т. конф. (8–11 ноября 2016г.) Днепр, 2016 г. С. 18–19.
11. Гошовский С.В., Сиротенко П.Т. Методы выявления просачиваний метанового газа и оценки его концентрации в водной толще. Газогидратные технологии в горном, нефтегазовом деле, геотехнике и энергетике : тез. докл. II Междунар. н.т. конф. (8–11 ноября 2016г.) Днепр, 2016 г. С. 44–45.
12. Грязевые вулканы Черного моря (каталог). Под редакцией акад. НАН Украины Шнюкова Е.Ф. Киев: ГНУ ОМГОР. 2014. 259 с.
13. Джафаров Д. С. Математическое моделирование диссоциации газогидратов в приложении к интерпретации исследований скважин газогидратных месторождений на нестационарных режимах фильтрации: дисс. на соиск. уч. степени канд. тех. наук. Росс. гос. унив. нефти и газа им. И.М. Губкина. Москва, 2015. 120 с.
14. Ефремова А.Г., Жижченко Б.П. Обнаружение кристаллогидратов газов в осадках современных акваторий. *ДАН СССР*. 1974. **214**, № 5. С. 1179–1181.
15. Захаренко В.С. Газогидраты: топливо будущего или фактор экологического риска?. *Учен. зап. МГПУ. Геогр. и экол. науки: сб. науч. ст. МГПУ*. Вып.3. Мурманск, 2010. С.42–48.
16. Зубова М.А. Гидраты природных газов в недрах Мирового океана. М.: ВНИИ Зарубежгеология. 1988. 61 с.
17. Исследования низкодозуемых ингибиторов гидратов в университете Хэриот-Ватт / Тохиди Б., Архманди М., Андерсон Р., Ян Ц. *Наука и техника в газовой пром-сти*. 2004. № 1–2. С.81–89.
18. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в России. *Газ. пром-сть*. 1996.
19. Карасевич А.М., Крейнин Е.В. Нетрадиционные газы – дополнительный ресурс газовой отрасли *Газ. пром-сть*. 2012. Спец. вып. № 676. С. 4–8.
20. Клименко В.В., Лопатенко С.В. Молекулярно-коагуляционный механизм образования газовых гидратов при аккумуляции холода. *Тепловые режимы и охлаждение радиоэлектронной аппаратуры*. 1995. № 1–2. С. 34–39.
21. Котомин А.Б. Газовые гидраты метана - перспективный нетрадиционный источник углеводородного сырья. *Север и рынок: формирование экономического порядка*. Апатиты, 2012. № 1(29). С. 98–102.
22. Кричфалуши В.И. Разработка технологической схемы утилизации шахтного газа с переводом его в гидрат: автореф. дис. канд. техн. Наук. Моск. горн. ин-т. М.: 1991. 18 с.
23. Кузнецов Ф.А., Дядин Ю.А., Родионова Т.В. Газовые гидраты – неисчерпаемый источник углеводородного сырья. *Рос. хим. журн.* 1997. №.41. С. 28–34.
24. Кузнецова С.Ю., Молчанова К.С. Газогидраты как альтернатива традиционным источникам энергии. *Междунар. журн. эксперим. образ.* 2011. № 7. С. 14–15.
25. Кульпин Л.Г., Кульпин Д.Л. Прогноз газогидратных скоплений в придонных слоях над Штокмановским ГКМ и анализ возможных техногенных осложнений. *Нефть, газ Арктики: материалы междунар. науч.-техн. конф.*, 27-29 июня 2006. – М.: Интерконтакт Наука. 2007. С. 275–284.
26. 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.
27. Кэрролл Дж. Гидраты природного газа: справ. Пособие. Пер. с англ. – М.: Премиум инжиниринг. 2007. 289 с.
28. Лю Тяньлэ. Обоснование и разработка промывочных и тампонажных составов для бурения скважин в условиях льдо- и гидратообразования (на примере разведки газогидратов в провинции Цинхай - КНР): автореф. дис. канд. техн. наук. Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный». СПб. 2013. 20 с.
29. Макогон Ю.Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения. *Геол. и полезн. ископ. Мирового океана*. 2010. №2. С. 5–21.

30. Макогон Ю.Ф. Газогидраты: результаты и проблемы. *Газ. пром-сть*. 2012. № 676 (спец. вып.). С. 82–87.
31. Макогон Ю.Ф. Исследование кристаллогидратов природных газов, методы их предупреждения и использования: автореф. дис. д-ра техн. Наук. ВНИИПГ. М.: 1975. 35 с.
32. Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы. *Российский химический журнал*. № 3. 2003.
33. Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы. *Рос. хим. журн.* 2003. **47**, № 3. С.70–79
34. Макогон Ю.Ф. Природные газогидраты: открытие и перспективы. *Газ. пром-сть*. 2001. № 5. С. 10–16.
35. Матвеева Т.В. Способ добычи газа из придонных субаквальных скоплений газовых гидратов. *Горн. журн.* 2012. № 3. С.81–85.
36. Матвеева Т.В., Соловьев В.А. Газовые гидраты Охотского моря: закономерности формирования и распространения. *Рос. хим. журн.* 2003. **47**. № 3. С. 101–111.
37. Накиченович Н., Грицевский А., Грюблер А. и др.: пер. Тер-Саркисова А.Р., Арзамасцева А.Г. Мировые перспективы природного газа. Под ред. Седых А.Д. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 84 с.
38. Обжиров А.И. Геология и методы поиска газогидратов. *Вестн. инж. школы ДВФУ*. 2012. № 1(10). С. 90–93.
39. Обжиров А.И., Телегин Ю.А. Метан нефтегазосодержащих пород - основной источник формирования газогидратов в Охотском море. *Газохимия*. 2011. № 1(17). С.44–49.
40. Перлова Е.В. Коммерчески значимые нетрадиционные ресурсы газа (газовые гидраты, угольные и сланцевые газы) – опыт освоения и перспективы для РФ. Материалы 4-й конф. геокриологов России. МГУ. 7-9 июня 2011. **1**, ч.1-4. М.: Универ. книга. 2011. С.346–352.
41. Пестрикова Н.Л., Обжиров А.И. Влияние потоков метана в газогидратосодержащих отложениях Охотского моря на окружающую экосистему. *Газохимия*. 2011. № 1(17). С. 50–53.
42. Попков В. И. Газогидраты – продукт глубинной дегазации Земли / В.И. Попков, В.А. Соловьев, Л.П. Соловьева. *Геология, география и глобальная энергия*. 2012. № 3 (46). С. 56–67.
43. Приближается эпоха газовых гидратов (интервью с В.А. Истоминым). *Газ. пром-сть*. 2006. № 1. С. 10–11.
44. Рахманов Р.Р. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании газонефтеносности недр. М.: Недра. 1987. 174 с.
45. Решетников А.А., Голованчиков А.Б. Образование газогидратов и способы их добычи. *Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та*. 2010. Вып.1(61). *Сер. Геология, процессы и аппараты хим. технологии*. Вып.3. С. 5–7.
46. Романовский Н.Н., Гаврилов Л.В., Пустовойт Г.В. и др. Распространение субмаринной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых. *Криосфера Земли*. **1**. № 3, 1997. С. 9–18.
47. Соловьев В.А. Газогидратоносность недр Мирового океана. *Газ. пром-сть*. 2001. № 12. С. 19–23.
48. Сорокин А.В., Хавкин А.Я. О механизме гидратообразования. *Нефть, газ Арктики: материалы междунар. науч.-техн. конф.*, 27–29 июня 2006. М.: Интерконтакт Наука. 2007. С. 227–236.
49. Басниев К.С., Кульчицкий В., Щebetов А.В., Нифантоа А.В. Способы разработки газогидратных месторождений. *Газ. пром-сть*. 2006. № 7. С. 22–24.
50. Сухоносенко А.Л. Термогидродинамическое моделирование процессов разработки газогидратных месторождений: дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина. М.: 2013.
51. Тер-Саркисов Р.М., Якушев В.С. Проблемы и перспективы ОАО «Газпром», связанные с газогидратами. *Наука и техника в газ. пром-сти*. 2003. № 4. С. 45–51, 53, 54.
52. Хавкин А.Я., Сорокин А.В., Табакаева Л.С. Влияние глубины природных водоемов на образование в них слоев газогидратов. *Естеств. и техн. науки*. 2010. № 3(47). С. 225–228.
53. Червякова Ю.И. Газовые гидраты в Западной Арктике: современное состояние и перспективы: материалы междунар. молодежн. конф., 26–29 сент. 2012. Мурманск: МГГУ 2012. С. 233–236

54. 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. **20**, № 3(81). С. 347–354.
55. 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. **2**. С. 71–72.
56. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Сыртланов В.Р. О возможности вымывания газа из газогидратного массива циркулирующей теплой воды. *Теплофизика, гидродинамика, теплотехника: сб. ст.* Вып. 4. Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. ун-та. 2008. С. 151–161.
57. Шиц Е.Ю., Калачева Л.П., Федорова А.Ф. и др. Химические превращения природного газа в форме его гидратов. *Хим. технология*. 2011. **12**, № 8. С. 494–497.
58. Шнюков Е. Ф., Старостенко В.И., Коболов В. П. Нам нужен матановый Лос-Аламос. *Еженедельник* 2000. №37(833). 15.09.17 С. В3
59. Шнюков Е. Ф., Старостенко В. И., Коболов В. П. К вопросу о газогидратности данных отложений Черного моря. *Геодинамика, тектоника и флюидодинамика нефтегазоносных районов Украины : тез. докл. VII Междунар. конф.* Симферополь: 2007.
60. Щепалов А. А. Тяжёлые нефти, газовые гидраты и другие перспективные источники углеводородного сырья: уч.-мет. Пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет. 2012. 93 с.
61. 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. **429**, № 2. С. 257–259.
62. Яблоков М. Взрывчатка на океанском дне. *Инженер*. 2006. № 10. С. 14–15.
63. Якуцени В.П. Газогидраты – нетрадиционное газовое сырье, их образование, свойства, распространение и геологические ресурсы. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2013. **8**. №4. С. 1–24.
64. Якушев В.С. Газовые гидраты в российской части Арктики. *Нефть, газ Арктики: материалы междунар. науч.-техн. конф.*, 27-29 июня 2006. М.: Интерконтакт Наука, 2007. С. 220–226.
65. Якушев В.С., Перлова Е.В., Истомин В.А. и др. Ресурсы и перспективы освоения нетрадиционных источников газа в России. М.: ИРЦ Газпром, 2007. 151 с.
66. Якушев В.С., Истомин В.А., Перлова Е.В. Ресурсы и перспективы освоения нетрадиционных источников газа в России. монография. М.: ВНИИГАЗ. 2002. С. 82–84.
67. Alyukov E «Combustible Ice» has started / Newspaper RBK №84 (2581) (1905) economy May 18.2017. URL : <http://www.rbc.ru/newspaper/2017/05/19/591d85609a794756b5373680>
68. Berge H. Hydrate Formation and CO₂-CH₄ Exchange in Sandstone. Master Thesis in Reservoir Physics. University of Bergen. June 2013/ URL : <http://bora.uib.no/handle/1956/6779>
69. Birktdal K. A. Hydrate (Formatioc) and CH₄ Production from Natural Gas Hydrates. Ifaster Thesis in Reservoir Physics University of Bergen. Norway, May 2009. URL : <http://bora.uib.no/handle/1956/7166>
70. Collett T.S. Energy resource potential of natural gas hydrates. *Bull. AAPG*. 2002. **86**, №11. P. 1971–1992. P. 130.
71. Collett T.S., Kmiskraa VA. Hvdrates contain vast store of world gas resources. *Oil and Gas J.*, 1998. V. **96**. № 19. P. 90–95.
72. DittreckP. New look at gas hydrates. *Oil and Gas J.*, 2006. **104**. №40. p. 17.
73. Fletcher S. US-India study discovers Large gas hydrate presence. *Oil and Gas J.* 2008. **106**. №7, P. 36–44.
74. Ftajan A Geophysical Characten/alums of Fluid Flow and On Hydrat Synggi of the NW-Svalhard and SW-fiarents Sea Margins A dissertation Hjj Ai AgpBgf Philosophise Doctor. University of Tromao. November 2012. p.127
75. India has 2.000 tm cubic ft prognostic gas hydrates pool. *The Financial Express*. 2008. Feb. 07.
76. Makogon Yu.F., Holditch S.D. Lab work clarifies gas hvdrate. *Oil and Gas I*. 2001. **99**. №6. P. 47–52.
77. Petzet A. SEG: Geophysics role Large in unconventional. *Oil and Gas J.*, 2007. **105**. № 17. P. 28–30.
78. Ramesh № Gas hydrates: an inexhaustible energy' source. *Business Line*. Friday. July 18, 2008.
79. Stott J. CERl: Arctic gas. LNG. hydrates key to gas supply gap. *Oil and Gas J.*. 2005. **103**, №11, P. 30.

80. United States Department of Energy. Methane Hydrate Report to Congress. September 2011 URL: <https://energy.gov/fe/downloads/methane-hydrate-annual-reports>
81. *Watkins E.* Japan exploring methane hydrate. *Oil and Gas J.*, 2006. **104**, № 39, P. 26.

Статья поступила 13.11.2017

С.В. Гошовський, О.В. Зур'ян

ГАЗОГІДРАТНІ ПОКЛАДИ: ФОРМУВАННЯ, РОЗВІДКА І ОСВОЄННЯ

Викладено короткий огляд наукових робіт, присвячених історії відкриття природних газогідратів, вивчення їх характеристик, умов формування, способів виявлення і розвідки, а також вирішення потенційних екологічних проблем розробки газогідратів.

Ключові слова: газогідрати, метаногідрати, сипи, грязьові вулкани, Чорне море.

S.V. Goshovskyi, A.V. Zurian

GAS-HYDRATE DEPOSITS: FORMATION, EXPLORATION AND EXPLOITATION

The work presents a brief review of scientific works devoted to the history of the discovery of natural gas hydrates, their characteristics, formation conditions, methods of detection and exploration, as well as environmental issues of exploitation.

Keywords: gas-hydrates, methanohydrates, seeps, mud volcanoes, Black Sea.