

УДК 553.981.2.04(100)

Якуцени В.П.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский нефтяной научно-исследовательский геологоразведочный институт» (ФГУП «ВНИГРИ»), Санкт-Петербург, Россия, ins@vnigri.ru

ГАЗОГИДРАТЫ – НЕТРАДИЦИОННОЕ ГАЗОВОЕ СЫРЬЕ, ИХ ОБРАЗОВАНИЕ, СВОЙСТВА, РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

Представлен краткий обзор информации о газогидратах как потенциальном нетрадиционном источнике углеводородного сырья. Интерес к этому виду нетрадиционных ресурсов углеводородов связан с тем, что его объёмы значительно превышают другие виды нетрадиционных источников. Даны сведения об основных свойствах газогидратов, а также геофизических и геохимических условиях, определяющих возможность их формирования и сохранности в осадочных толщах. Представлены данные оценки ресурсов газогидратов в России и в мире.

Ключевые слова: газогидраты, нетрадиционный источник углеводородного сырья, свободный газ, газовые месторождения, геологические ресурсы, технологии добычи.

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 резервов 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 из-за высокой стоимости технологий освоения этих ресурсов и негативных экологических последствий 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.

Газогидраты – твердые нестехиометрические соединения (т.е. переменного состава) клеточного типа – клатраты (лат. «clathratus» - помещенный в клетку). Соединения этого типа известны еще с 1811 г., когда Г. Дэви (англ.) получил гидрат хлора ($\text{Cl}_2 \cdot 5,75 \text{H}_2\text{O}$), насыщая им воду при $t \sim 0^\circ\text{C}$. Но само название соединениям этого типа – клатраты, было присвоено лишь в 1948 г. Пауэллом. Клатратные соединения в общем виде описываются формулой: $M \cdot n \text{H}_2\text{O}$, где M – молекула газа, n - число молекул воды.

Газогидраты формируются путем включения молекул газа (легколетучих жидкостей) в полости каркаса (кристаллической решетки) построенного молекулами H_2O в определенных для каждого компонента газа термодинамических условиях. При их нарушении молекулы «гостей», т.е. газа, удерживаемые в ажурном водном каркасе слабыми силами ван-дер-ваальса, покидают его, и гидрат разлагается на газ и пресную воду со значительным поглощением тепла.

Для клатратных каркасов возможны кубические, тетрагональные и гексагональные структуры с разной численностью молекул воды и разноразмерными полостями. Молекулы CH_4 , преобладающие среди природных газов, заполняют водный каркас предпочтительно кубической структуры I и II типов.

Численность и размеры полостей внутри каркаса кристаллической решетки воды зависят от структуры и числа молекул H_2O создавших его. Так кубическая структура I-го типа формируется из 46 молекул H_2O и состоит из 6 больших и 2 малых полостей, а II типа – уже 136 молекул H_2O и состоит из 8 больших и 16 малых полостей. Ограниченность числа и объемов полостей в решетке водного каркаса ограничивает и диаметры молекул-«гостей». Это могут быть газы, диаметр молекул которых находится в интервале 0,38-0,92 нм. Среди них: C_1 - iC_4 ; CH_4 , N_2 , H_2S , SO_2 , CO_2 , O_2 , Ar и Xe . Возможны также и другие гидратообразующие молекулы, не относящиеся к природным газам, к примеру, легколетучие Cl_2 , Br_2 , ClO_2 и пр.

В каждую полость «хозяина», т.е. в решетки водного каркаса, входит только одна молекула «гостя» (газа), а они весьма различны, в зависимости от компонентного состава газа и термобарических условий среды. Так молекула метаногидрата – $CH_4 \cdot 5,75 H_2O$ свободно занимает любую полость в кубическом каркасе, а входящая в состав гексогональной структуры сложная по составу молекулярная смесь – $CH_3C_6H_{11} \cdot 5H_2S \cdot 34 H_2O$ нуждается уже в больших по объему полостях. Термодинамической устойчивостью обладают только клатраты с наиболее полным заполнением «гостями» его полостей (>95%).

Не переходят в гидратное состояние: H_2 , He , Ne , $n-C_4$ и $C_{5+высш}$. Гелий легко может проникнуть в гидратную структуру, но лишь в ничтожном количестве, в качестве свободной примеси, т.к. в силу своей абсолютной инертности, соединений с H_2O он дать не может, т.е. силами ван-дер-ваальса в полостях каркаса водной решетки каркаса он не удерживается, и столь же легко покидает их, как и поступает. В итоге возникают геохимические аномалии в залежах многокомпонентных по составу свободных газов, находящихся в зоне гидратообразования. Эти аномалии приобретают поисковое значение. Появление внутри

таких объектов на ограниченных участках газопродуктивного пласта четких газогеохимических аномалий – увеличение концентраций гелия, снижение содержания CH_4 – рассматривают как участки охваченные процессом газогидратообразования.

Физические свойства газогидратов. Каркас водных молекул метаногидрата кубической структуры подобен льду и по многим свойствам схож с ним. Его плотность изменяется в пределах $0,908-0,917 \text{ г/см}^3$ в зависимости от типа структуры ГГ и заполненности ее полостей CH_4 . Для сравнения – у гексагональной структуры льда плотность равна $0,912 \text{ г/см}^3$. Близки и многие физико-механические их свойства – модули Юнга, Пуассона, а также скорость звука, электрические и теплофизические свойства. В частности ГГ подобно льду цементируют породы и заметно увеличивают их механическую прочность.

В табл. 1 и 2 приведены значения основных показателей, относящихся к физическим свойствам газогидратов, необходимые для моделирования условий их существования в природе и диагностики. Дополнительно отметим, что теплота фазовых переходов гидратов метана в газ и воду почти в 1,5 раза выше, чем перехода льда в воду. Теплопроводность моногидрата метана почти в 4 раза меньше теплопроводности льда. При этом теплопроводность гидратонасыщенного грунта меньше теплопроводности мерзлого грунта лишь в 2 раза (по данным E.D. Sloan, 1998). Величина статистической диэлектрической постоянной у гидратов близка к 58 (табл. 1), а у льда – 80.

Таблица 1

Механические и электрические свойства газовых гидратов

Свойства	Газовые гидраты	
	КС-I	КС-II
Параметры элементарной ячейки при 273,15 К, нм	$a = 1,197-1,215$	$a = 1,714-1,757$
Число молекул воды в элементарной ячейке	46	136
Кристаллографическая плотность каркаса, г/см^3	0,796	0,782
Объемное термическое расширение, K^{-1}	$(1,5-1,7) \times 10^{-4}$ (оценка)	$(1,5-1,7) \times 10^{-4}$ (оценка)
Изотермический модуль Юнга при 268 К, МПа	$8,4 \times 10^3$ (оценка)	$7,2 \times 10^3$ (оценка)
Модуль Пуассона	$\approx 0,3$	
Скорость звука (продольная) при 273,15 К, км/с	3,5-3,8	
Статическая диэлектрическая постоянная при 273,15 К	≈ 58	
Высокочастотная диэлектрическая постоянная при 273 К	3,4 (оценка)	
Коэффициент теплопроводности при 273К, Вт/(м·К)	0,5	

Таблица 2

Энтальпия диссоциации гидратов метана и его отдельных гомологов

Гидрат	Энтальпия диссоциации ΔH , кДж/моль	
	на газ и воду	на газ и лед
$\text{CH}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	$54,19 \pm 0,28$	$18,13 \pm 0,27$
$\text{C}_2\text{H}_6 \cdot 7,67 \text{H}_2\text{O}$	$71,80 \pm 0,38$	$25,70 \pm 0,37$
$\text{C}_3\text{H}_8 \cdot 17 \text{H}_2\text{O}$	$129,2 \pm 0,40$	$27,00 \pm 0,33$
$\text{C}_4\text{H}_{10} \cdot 17 \text{H}_2\text{O}$	$133,2 \pm 0,30$	$31,07 \pm 0,20$

В литературных источниках часто встречаются разные величины газосодержаний в метаногидратах при их разложении – $130-186 \text{ м}^3/\text{м}^3$, возможно, это связано с исследованием газогидратных систем неполного заполнения «гостями» структуры «хозяина» или их неоднородностью. Удельное газосодержание CH_4 при полном заполнении полостей газогидратов кубической структуры I-го типа с плотностью $0,916 \text{ г}/\text{см}^3$ при разложении составляет $170,6 \text{ м}^3$.

Термодинамическая стабильность газогидратов, это основное условие для среды образования и сохранения гидратов и соответственно важный критерий для выявления зон возможного газогидратообразования (ЗВГО). Нарушение термодинамических (ТД) условий в системе приводит к разложению гидратов. Основные параметры пласта, которые должны быть охарактеризованы при этом для выделения ЗВГО – температура, давление, состав газа и минерализация пластовых вод, а также литофациальный состав (проницаемость) пласта.

График на рис. 1 характеризует термодинамические условия гидратообразования для природных газов наиболее распространенных в недрах. Как видно на графике, в гидратное состояние легко переходят CH_4 , CO_2 и H_2S . Значительно труднее N_2 , ему необходимы либо более низкие температуры, либо высокие давления. Сочетание низких температур и высоких давлений в недрах характерно только для криолитозон, поэтому зоны образования газогидратов в отложениях суши приурочены именно к зонам «вечной мерзлоты».

В результате расхождения в значениях физических параметрах необходимых для образования газогидратов из отдельных компонентов газов происходит фракционирование состава многокомпонентных природных газов как в гидратах, так и в остаточном свободном газе в ЗВГО. Поэтому, чем разнообразнее состав природных газов, тем сложнее определять реальные границы ЗВГО. К тому же каркас решетки клатрата строится только из молекул H_2O , без сопутствующих минеральных компонентов и при интенсивном газогидратообразовании изменяется не только состав газа, но также и минерализация пластовых вод. Если в зонах затрудненного водообмена, в продуктивном пласте в ЗВГО появляются участки повышенной минерализации подземных вод, но с идентичным

химическим составом или скопления свободных газов с повышенным содержанием гелия, то можно предположить, что на данном участке имело место в прошлом или происходит в настоящее время газогидратообразование.

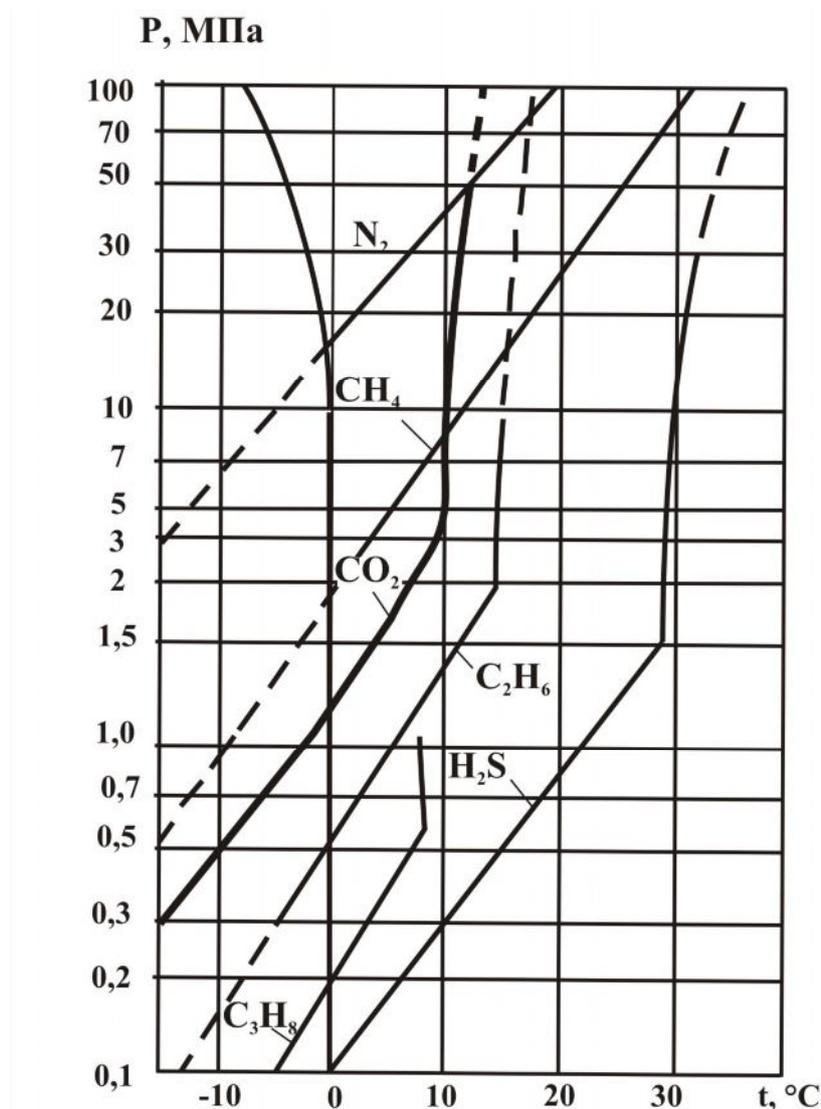


Рис. 1. Равновесные термобарические условия гидратообразования для индивидуальных газов [Макогон, Фомина, 1980]

Высокая минерализация пластовых вод не только тормозит, но иногда и исключает возможность реализации процессов газогидратообразования, поскольку полости каркаса решетки воды заняты молекулами соли. Особенно это относится в России к НПП Восточной Сибири, где минерализация пластовых вод хлоркальциевого состава достигает в отдельных регионах 300-400 г/кг, при высоком содержании CaCl_2 . Общеизвестно, что CaCl_2 в концентрации 25-35% (вес) является активным ингибитором техногенного газогидратообразования и широко используется в нефтегазопромысловой практике для его предотвращения. Высокая антигидратная активность пластовых вод Восточной Сибири, как

и в целом их высокая минерализация затрудняет и даже местами исключает возможность газогидратообразования. На промыслах Западной Сибири, где минерализация пластовых вод сравнительно низкая ~ 15-30 г/л, процессы техногенного (и не только) гидратообразования на промыслах весьма активны. Отметим также, что естественная минерализация пластовых вод, превышающая 100 г/л, понижает равновесную температуру гидратообразования на 5-12 °С.

Следует остановиться и еще на одном факторе влияния на процессы газогидратообразования в недрах – литолого-фациальном составе газопродуктивных пород. Исследования, выполненные В.С. Якушевым [Якушев, 2009], показали, что активность процессов газогидратообразования в недрах изменяется в любую сторону и даже прекращается в зависимости от степени проницаемости отложений. Наиболее благоприятные условия для образования и накопления газогидратов имеются в хорошо проницаемых чистых тонкозернистых песках. С увеличением примесей глинистых частиц отклонения в ТД параметрах газогидратообразования возрастают. В тяжелых глинах, чем ниже влажность (< 10% об.), тем меньше вероятность газогидратообразования, поскольку связанная пленочная вода, а также капиллярная и осмотическая вода в этих процессах практически не участвует. Но в тех же тяжелых глинах с высокой влажностью (> 80% об.) гидратообразование происходит и при более мягких ТД условиях в сравнении с равновесными.

Таким образом, важно подчеркнуть, что интервалы границ ЗВГО в естественных условиях недр подвижны и прогнозируя их, необходимо оценивать не только термодинамические параметры среды, но также составы, объемы воды и газа и их подвижность в недрах, т.е. проницаемость пород, обеспечивающую непрерывность в обновлении контактов газ-вода для полноценной реализации процесса газогидратообразования.

Приведем пример визуального наблюдения за образованием газогидратов в условиях подвижных контактов газа и воды по материалам зарубежной прессы о катастрофе на платформе ДН в Мексиканском заливе на глубоководном нефтяном месторождении Masonda Prospect с запасами 100 млн. бар (20.04.2010 г.). «После аварийного взрыва на устье скважины, газ под высоким давлением (> 88 атм) достиг платформы. Гейзер высотой до 70 м фонтанировал на вершущке буровой вышки. Из него вниз сыпались похожие на снег хлопья, дымящиеся от испарения метана». Естественно, что непосредственно в ходе катастрофы никто не изучал этот процесс, поскольку от взрыва на скважине и до пожара на платформе

прошло всего 2 минуты, но очевидно, что «снег» - это гидраты метана с гомологами, образовавшиеся при турбулентном фонтанировании газа, нефти и воды в условиях резко снизившейся температуры из-за внезапного адиабатического расширения газа, с поглощением тепла. Впоследствии мощное гидратообразование вблизи устья скважины (на глубине 1,57 км) затрудняло ликвидацию аварии (1,5 км глубина залива, 3,9 км поддонная глубина забоя скважины, давление в продуктивном пласте около 600 атм).

Примерно те же процессы, только уже в природных, а не техногенных условиях, имеют место и при выбросах подводных грязевых вулканов, формирующих на поверхности дна вокруг жерла грязевого вулкана разномасштабные поля метаногидратов.

Методы обнаружения газогидратов. Достоверную информацию о наличии газогидратов в недрах обеспечивают только прямые методы, т.е. их визуальное наблюдение в кернах из скважин или донных пробоотборников (гравитационных трубок и пр.) поднятых из ЗВГО. Все остальные используемые при поисках газогидратов методы (геохимические и геофизические) носят косвенный характер. Абсолютное большинство проявлений зафиксированных в качестве газогидратов в субаквальных условиях носят именно косвенный характер и лишь в объектах со сравнительно высокой гидратонасыщенностью отложений – более 20-30%, их наличие приобретает убедительный характер.

Геофизические методы активно используются в практике поиска газогидратов, как наиболее освоенные и экономически доступные, особенно в акваториях. Но по информативности они часто остаются не более чем косвенные. В их основе значимые отличия физических свойств газа, воды и газогидратов. С другой стороны, близость ряда свойств газогидратов к свойствам льда затрудняет их дифференциацию, особенно если в осадках одновременно находятся все три фазы – твердая, жидкая и газовая в близких объемах. В таких объектах надежность геофизических методов резко снижается. К тому же основная часть газогидратов встречается в ЗВГО в виде аксессуарных включений разных форм, или иглообразных стяжений и тонких прослоек в толще дисперсных пород разного состава и структуры, т.е. мелких, рассеянных скоплений.

Если объемы газогидратов не превышают 10-15% от объема вмещающих пород, то их обнаружение геофизическими методами маловероятно.

Уверенно диагностируются геофизически моногидраты с примесью терригенного материала не более 5-10%. В меньшей мере образцы с примесью газогидратов более 40% при условии отсутствия в них льда.

Для выявления газогидратов используется электрокаротаж (удельное сопротивление, спонтанная поляризация и др.), разновидности радиоактивного каротажа и сейсмоакустика. Наиболее значимым признаком возможного присутствия газогидратов под дном акваторий в ЗВГО считается наличие на сейсмических профилях отражающего горизонта BSR* – «ложного донного отражения», и разного рода аномалий на акустических профилях в виде чередующихся темных и светлых треугольников, «пагод» и «ярких пятен» (VAMP's**), формирование которых связывают с наличием газогидратов, учитывая их пространственное совпадение с ЗВГО (см. рис. 1). Присутствие в них газогидратов иногда подтверждалось результатами бурения, но далеко не всегда. Поэтому обсуждались и иные причины их появления, в основном связанные с диагенезом донных осадков или геохимическими процессами в них, изменяющими их физические свойства, и даже дефектом самого метода фокусированием акустического сигнала неровностями морского дна и пр. Имели место и обратные наблюдения – отсутствие аномалий на сейсмопрофилях при наличии газогидратов в кернах скважин (пробоотборниках). Несмотря на сложности в интерпретациях результатов акустических методов они и ныне широко используются в практике выявления газогидратов в донных отложениях на основании частых совпадений сигналов BSR и VAMP's с зоной термодинамически благоприятного газогидратообразования, особенно при высокой газонасыщенности донных отложений (свободной, в виде рассеянных газовых пузырьков), с весьма умеренной минерализацией (35г/л) насыщающих их морских вод и слабой уплотненностью осадков.

Сравнительно надежны отдельные из промыслово-геофизических методов при скважинном каротаже в ходе проходки пород в ЗВГО с пропластками сравнительно чистых гидратов (< 10-15% примесей), при условии определенных ограничений в технологии бурения (применение холодных буровых растворов и ингибиторов в комплексе с газовым каротажем и пр.).

Геохимические методы выявления газогидратов основаны прежде всего на различиях в химических составах природных газов и их гидратообразующих свойств, а также в степени минерализации пластовых вод в ЗВГО. Поскольку не все природные газы образуют газогидраты, а гидратная решетка строится молекулами H₂O, без участия растворенных в пластовой воде минеральных компонентов, то очевидно, что при интенсивном газогидратообразовании неизбежно возникнут локальные газогидрохимические аномалии. К

* BSR – Botton Simulating Reflectors

** VAMP'S – AMMPeitude – fleatures – «яркое пятно»

примеру, остаточный свободный газ обогатится неоном, гелием и высшими гомологами метана и одновременно потеряет значительную часть CH_4 из природных газов, а также газов легко переходящих в гидратное состояние (CO_2 , H_2S и пр.). При этом остаточные пластовые воды повысят минерализацию, сохранив ее общий состав, и изменится состав газа относительно пластовой воды.

Но геохимические методы, также как и геофизические не всегда корректны. Так пониженная минерализация пластовых вод может быть связана с дегидратацией глинистых минералов, а не с процессом газогидратообразования.

Используются, хотя и редко из-за аппаратурных сложностей и высокой стоимости анализов, изотопные методы. Особенно информативен $\delta^{13}\text{C}$ метана для обоснования источника газа – катагенный (~ -35‰) или биогенный (-75‰).

Геологические признаки газогидратов. Наличие газогидратов в образце керна, поднятого из ЗВГО в герметичном пробоотборнике можно оценить по избыточному объему свободного газа выделившегося из контейнера, сравнительно с емкостными возможностями керна и контейнера при одновременном охлаждении стенок контейнера и образца, поскольку разложение газогидратов идет с потерей тепла (адиабатическое расширение газа). При быстром подъеме образца осадков можно также наблюдать пузырящуюся поверхность керна в пробоотборнике, а также выдавливание осадка из грунтоноса из-за избыточного возрастания в нем давления за счет образующегося свободного газа при разложении газогидратов.

Если осадки цементированы газогидратами, подобно мерзлоте, то при бурении уменьшается скорость проходки за счет увеличения плотности таких пород. При использовании теплого бурового раствора при их прохождении в стволе скважины формируются каверны, а также наблюдается интенсивное газирование промывочного раствора с глубины, не соответствующей возможности высокой газонасыщенности недр. При проходке скважин с холодным раствором эти явления не наблюдаются. Не наблюдаются они также, если газогидратов выявлены, но их количество не превышает 10-15%.

Газогидраты в многолетнемерзлых породах (ММП). Необходимость исследования этого феномена связана с многочисленными случаями аварий – взрывов, пожаров, выбросов бурового раствора при прохождении бурением многолетнемерзлых пород, широко распространенных не только в арктических широтах планеты, но также и в значительно более южных зонах, например, в Восточной Сибири (Лено-Тунгусская НПП). Местами мощность ММП достигает 500-600 м, породы цементированы льдом, т.е. практически не

проницаемы. Коллекторами для формирования газовых скоплений не располагают, но никаких иных причин для объяснений аварий, кроме как взрывами газа, нет. Надо отметить также, что в ряде случаев такие газопроявления отмечались и выше зоны верхней границы криолитозоны вплоть до поверхности при условии сохранения отрицательных температур, т.е. вне зон таликов и пр.

Исследования физико-химических основ формирования разных состояний природных газов в недрах, включая газогидраты, в условиях отрицательных температур, выполненные В.С. Якушевым [Якушев, 2009], а также проведенные им экспериментальные работы и полевые исследования показали способность газогидратов к самоконсервации. Суть эффекта состоит в том, что при снижении давления в ММП ниже равновесного для ЗВГО (инверсия на суше или регрессия уровня океана) ранее сформировавшиеся скопления газогидратов распадаются, но в условиях сохранения отрицательной температуры в ММП выделившаяся на их поверхности пресная вода замерзает, покрывая газогидраты ледяным панцирем и защищает его от дальнейшего разложения. Дальнейшая судьба таких «законсервированных» газогидратов зависит от термобарической стабильности недр в геологическом времени и структуры самих гидратов.

Именно такого рода керны (супеси и суглинки) с льдистыми газогидратными скоплениями получены из скважин пробуренных на Бованенковском и Ямбургском месторождениях (п-в Ямал, Россия) в четвертичных отложениях на глубинах, начиная с 30 м и до 110-130 м, т.е. значительно выше верхней границы ЗВГО.

По химическому составу газ полученный из разложившегося газогидрата близок к биогенному – метан 91-92%, азот – 8-9%. Многие мерзлые образцы пород получены из песчаных прослоев четвертичных отложений.

Катастрофические газопроявлениями при бурении в ММП вероятно надо связывать с наличием карманов со свободным «реликтовым» газом, не перешедшим полностью в гидрат из-за дефицита свободной воды в мерзлых породах, поскольку разложение гидратов при вскрытии их скважиной – замедленный энергоемкий, а не взрывоопасный процесс, т.е. нужно время на разложение газогидратов и аккумуляцию газов в достаточном объеме для реализации аварийных процессов

Вывод, который можно сделать из полученных В.С. Якушевым [Якушев, 2009] материалов, состоит в том, что самоконсервация газогидратов в ММП и их сохранение в реликтовом состоянии – широко распространенное явление в районах распространения ММП и его надо учитывать при оценке масштабов геологических ресурсов газогидратов,

наряду с теми, которые учитываются в ЗВГО. Но связывать их наличие с катастрофическими газопроявлениями при бурении в ММП с длительными дебитами газа до $10 \div 14$ тыс. м³/сут. можно только при учете карманов со свободным газом, мигрировавшим с глубин и не перешедшим в газогидратное состояние из-за дефицита свободной воды в мерзлых породах.

Распространение газогидратов и основные зоны их концентрации. Рассматривая в целом газопродуктивность недр и условия стабильности в распространении зон гидратообразования, можно выделить два основных планетарных блока – континентальной и аквальный, где реально уверенное выделение зон стабильности газогидратов.

Распространение газогидратов крайне широкое, но в основном рассеянное. Они встречаются всюду в недрах, где есть газ, вода с умеренной минерализацией и соответствующая стабильности газогидратообразования термобарическая обстановка. Примерно 10-20% площади холодных недр на материках включают зоны распространения вечной мерзлоты и 80-90% акваторий на шельфах и континентальных склонах удовлетворяют условиям гидратообразования.

Учитывая в целом газопродуктивность недр и ориентируясь на линейный в основном характер распределения температур и давлений в большинстве регионов Земли, а также приуроченность равновесных условий стабильности гидратообразования к верхним этажам осадочного чехла как на суше, так и в акваториях, со сравнительно умеренными температурами ($-5 \div 15$ °С) и давлениями (до 100 мПа), можно выделить два основных блока планетарных регионов – континентальной и аквальный, где реальность формирования зон стабильности газогидратов подтверждается как расчетами по косвенным признакам, так и прямыми находками в кернах скважин или пробоотборников.

Континентальный блок включает газопродуктивный осадочный чехол в пределах арктической суши, вместе с прибрежным мелководьем (до 100 м), а также территории с мощной криолитозоной (< 300 м) с несколько иными термодинамическими параметрами для ЗВГО.

Газогидратов образуются и накапливаются в залежах газовых месторождений, находящихся полностью или частично в ЗВГО, а также в толще ММП и под их подошвой в мелких скоплениях газов. В залежах с промышленными запасами свободных газов, находящихся в зонах термобарической стабильности, газогидраты накапливаются в основном на водногазовых контактах, формируя как бы «снежные» ореолы по контурам залежи хорошо выделяемые геофизическими методами. Образуются они и во внутренних, обводненных частях залежей – линзах, пропластках и пр., причем не только газовых, а также

и нефтяных при их высоком газонасыщении. Свободный газ залежей в основном своем объеме в твердое гидратное состояние в ЗВГО не переходит, что связано с дефицитом свободной воды в порах коллектора, занятых газом. Имеющаяся в нем связанная (пленочная) вода участия в процессах гидратообразования не принимает она прочно удерживается породой. Достоверно газогидраты были выявлены во многих образцах керна при бурении скважин в газовых месторождениях арктического склона Северо-Американского континента на Аляске и в Канаде (Прадхо-Бей, Купа-Рук, Малик и др.).

В России состояние изученности распространенности газогидратов в недрах суши низкое, причем не столько из-за отсутствия интереса к ним, сколько в связи с тем, что кровли абсолютного большинства выявленных газовых залежей даже в полярных районах страны находятся глубже расчетных подошв ЗВСГ, пример – надсеноманские отложения Ямала.

В качестве газового месторождения с газогидратами определенными по косвенным признакам (геофизическим и геохимическим) в России рассматривалось Мессояхское в Западной Сибири. Высказывались даже предположения о доле участия газогидратов в газоснабжении Норильска – 2 из 9 млрд.м³ газа, якобы было подано потребителю за счет разложения газогидратов после снижения давления в залежи при добыче газа. Исследования, выполненные позже институтом «ВНИИОкеангеология» [Гинзбург, Соловьев, 1995] с целью выявления признаков газогидратов на этом же месторождении, не подтвердили их наличия, но и не исключили возможности их присутствия на более раннем этапе разработки месторождения на основе гелиевой аномалии в остаточном газе, хотя и не в таких масштабах, которые отмечены выше.

К территориям возможного накопления газогидратов на континенте в России относят также и газопродуктивные отложения находящиеся под мощной толщей многолетнемерзлых пород, распространяющихся в азиатской части РФ далеко на юг Восточной Сибири. Вечная мерзлота покрывает примерно 60% территории России и почти всю обширную территорию Сибирской платформы.

Ее мощность, даже в южных газопродуктивных районах составляет 500-600 м (Непско-Ботуобинская антеклиза), а в центральной части платформы достигает 1,5-2,0 км. Вслед за подошвой вечномерзлых пород с ее близкими к 0 °С и даже минусовыми температурами, опускается и вся зона возможного газогидратообразования, но только в пределах зон с маломинерализованными водами..

Длительное время толща ММП не рассматривалась как содержащая газогидраты, учитывая отсутствие в ней коллекторов и сомнительную возможность миграционных

процессов. Но требовали объяснения многочисленные случаи аварийных ситуаций при бурении скважин в верхних (30-50 м и глубже) частях мерзлых отложений – взрывы, пожары, выбросы газа и буровых растворов.

Как отмечалось выше, В.С. Якушевым [Якушев, 2009] было показано, что если газ накопился в отложениях в предшествующий доледниковый период, то при похолодании и замерзании воды и, соответственно, ее опреснении, он мог перейти в твердое гидратное состояние и законсервироваться в мерзлых породах. При смягчении термобарических условий (потепление, инверсия с эрозией, т.е. снижение давления) газогидрат, начав разлагаться, в зонах с минусовыми температурами в мерзлоте покрывается ледяной коркой из воды выделившейся в начале его распада. Его разложение под ледяным панцирем прекращается и газогидрат самоконсервируется в ММП на неопределенно долгое время. Именно реликтовые гидраты и насыщают мерзлые породы во многих регионах с криолитозоной, провоцируя аварийные события при бурении. Именно такие процессы консервации газогидратов видимо имели место и в Восточной Сибири, чему неизбежно способствовала климатическая стабильность региона, общеизвестного как континентальный «полюс холода» планеты (г. Верхоянск), а также инверсия платформы с эрозией со снижением давления. Аналогичные процессы наблюдаются и на севере Западной Сибири. По расчетам подошва зоны термодинамической стабильности газогидратов в Надым-Пур-Тазовском районе – 730 м находится существенно выше кровли сеномана 900-1000 м – главного газоносного комплекса в регионе. Мощность криолитозоны в районе 350-500 м. Признаков газогидратов в сеномане не фиксировалось, но аварийные ситуации при бурении в надсеноманских отложениях были многочисленными. Выполненные С.А. Леоновым исследования показали, что подошва криолитозоны на Ямбургском месторождении достигает 400 м, а ЗВГО находится в интервале глубин 260-730 м. При бурении скважин уже на глубинах 60-200 м наблюдались интенсивные, но быстро затухающие газопроявления. В частности на Анерьяхской площади при бурении отмечалось не только разгазирование бурового раствора, но и его выброс на высоту до 6 м с объемом промывочной воды до 120 м³. Наиболее интенсивные газопроявления отмечались из песков тибейсалинской континентальной подсвиты, мощностью 20 м в интервале глубин 400-550 м, т.е. непосредственно под криолитозоной в интервале ЗВГО.

Состояние изученности распространения газогидратов в недрах суши России низкое. Первоначально к территориям возможного гидратообразования относили не только недра НГБ находящиеся в арктических широтах, но также и недра под мощной многолетней

мерзлотой, т.е. практически всю южную часть Сибирской платформы. Позднейшие исследования показали, что поскольку газогидраты образуются только с пресными (маломинерализованными) водами, то НГБ с хлоркальциевыми рассолами в подмерзлотных должны исключаться из зон возможного газгидратообразования. Таким образом, основную газопродуктивную часть недр обширной холодной Лено-Тунгусской НГП с минерализацией вод хлоркальциевого типа до 300-500 г/л, включать в перечень зон возможного подмерзлотного газогидратообразования нецелесообразно. Попутно отметим, что технические растворы CaCl_2 , т.е. аналоги природных рассолов Восточной Сибири, используются в качестве ингибиторов для очистки загидраченных скважин при газодобыче.

Уникальная находка газогидратов в континентальной части РФ была сделана в 2009 г. с помощью аппарата «Мир-2». На дне пресноводного оз. Байкал, на глубине 2,4 км над поверхностью дна озера в районе грязевого вулкана «Санкт-Петербург», действующего в виде факела высотой 900 м, были обнаружены массивные холмы из газогидратов, поднимающиеся над поверхностью дна и уходящие в толщу донных отложений, слегка присыпанные рыхлыми осадками, осыпающимися при толчках.

По предварительным оценкам запасы газогидратов на дне Байкала близки к 1,4 трлн. м³ в эквиваленте свободной фазы.

Манипулятором на аппарате от монолитного массива с трудом были отколоты фрагменты моногидрата. Крупный обломок закрепили зажимом манипулятора, а более мелкие поместили в пластиковый контейнер без дна (учитывая плавучесть газогидратов в воде) и с мелкими отверстиями в крышке для выхода газа. По мере подъема аппарата термобарические условия среды менялись и на глубине 150 м от поверхности крупный фрагмент газогидратов зажатый в манипуляторе начал разваливаться. Наиболее крупные его обломки, обгоняя аппарат, уплыли вверх, мелкие отставали, выделяя струйки газа. На глубине 106 м мелкие фрагменты газогидратов оставшиеся в контейнере начали газировать снизу, т.е. нераспавшиеся остатки оказались в безводной газовой среде на специальной подложке. Они заледенели и в виде смерзшегося «куска» размером в кулак были доставлены на поверхность и помещены в морозильную камеру с температурой $-180\text{ }^\circ\text{C}$, для дальнейших исследований.

Байкальские газогидраты уникальны и это в высшей степени интересный объект для исследований, но безусловно не для разработки в качестве источника газового сырья по экологическим причинам. Оценивая изученность газогидратности континентальной части суши России и ее акваторий, надо отметить, что она пока еще на слишком низком уровне, но

очевидность широкого распространения газогидратов, особенно в субаквальной обстановке северного арктического и тихоокеанского побережий сомнений не вызывает.

Условия образования газогидратов здесь идеальны – динамичный метан, непрерывно поставляемый грязевым вулканом, пресная вода, низкие температуры (3-4 °С) и высокое давление (~ 100 атм).

Разнообразие условий в недрах не позволяют назвать конкретные термодинамические параметры для предельных условий газогидратообразования в свободных газовых скоплениях (залежах), их можно определить только для конкретных объектов. Отметим к примеру, что при температуре 10 °С в газопродуктивном пласте, при прочих благоприятных условиях метаноидрат может быть образован на глубине до 700-800 м.

Аквальный блок включает акватории континентальных шельфов, вместе с массивами обрушений осадков на материковых склонах и субмаринных оползней, а также внутренних морей и глубоководных озер. В этих объектах почти повсеместно имеются благоприятные термобарические условия для стабильности газогидратов (исключая мелководье без криолитозоны), а также постоянно возобновляемые, значительные объемы гидратообразующих газов – CH_4 , CO_2 и H_2S и слабоминерализованная вода - $\leq 35\%$.

По источникам газов, условиям образования и накопления субаквальные газогидратов четко подразделяются на газогидратов в придонных осадках и в газовых залежах более глубоких недр – катагенных аналогов месторождениям на суше. Лидерами в планетарном масштабе по распространению и накоплению метаноидратов и разнообразию их форм, являются донные отложения шельфов и их склонов, особенно в сейсмоактивных регионах. Источником газа для них служит, в основном, биогенный метан, а также катагенный, мигрирующий с глубин по тектоническим дислокациям и с грязевыми вулканами. Именно глубинный газ формирует в донных отложениях и на их поверхности наиболее крупные скопления моноидратов, почти лишенные терригенных примесей.

Огромные площади ложа глубоководной (>5,0 км) гипабиссальной платформы Мирового океана с мощностью осадков меньше 500 м из области ЗВГО практически исключаются. Глубоководные илы и глины представлены в их донных осадках в основном мощностями от единиц-десятков см, реже немногими метрами, обеднены ОВ и практически не газоносны, т.е. в них нет в достаточном объеме главного составляющего газогидрата – метана.

Среднее содержание $C_{\text{орг}}$ в глубинных зонах Мирового океана (>3 км) составляет, примерно, 0,10%, в окраинных зонах – 0,41-0,50%, а на континентальных склонах и в зонах

обрушений осадков шельфа – 0,74 %. Если принять во внимание, что с приближением к континентам нарастает мощность осадков, содержание $C_{орг}$ в них и повышается температура, т.е. увеличивается общий объем ОБ и ускоряется его деструкция и генерация CH_4 , то очевидно, что в глубоководных частях Мирового океана сравнительно с континентальным шельфом не приходится рассчитывать на заметное образование и накопление газогидратов, хотя единичные находки газогидратов в Мировом Океане есть и на больших глубинах.

Изученность газогидратности Мирового океана низкая, что естественно, учитывая, что он занимает 70,8% наименее доступной для исследований площади Земли. Сравнительно детально исследованы арктические склоны Северной Америки - Аляска, конуса выноса отложений дельты р. Маккензи в море Бофорта, Арктического Архипелага Канады и хребта Блейк (Атлантика, юго-восток США). Особенно активно исследования газогидратов велись в 80-90 годах США и Канадой в кооперации с другими странами на основе Межправительственных соглашений. Результаты исследований широко публиковались и обобщены по состоянию изученности на 1994 г. в монографии «Субмаринные газовые гидраты» [Гинзбург, Соловьев, 1995].

Ныне прибрежные окраины почти всех континентов и внутренних морей с разной степенью детальности исследованы на газогидратность. Основные открытия газогидратов в кернах были получены в большинстве морей под слоем донных осадков на поддонной глубине не менее 30-50 см в виде тонких прослоев и сцементированных гидратами осадочных отложений.

Есть ещё один, возможно значимый, но крайне мало изученный резерв ресурсов природных газов в виде газогидратов. Связан он с сейсмически подвижными акваториями – жильный или массивный моногидрат, приуроченный к разломам и каналам поступления глубинного катагенного метана в зонах тектонической активизации (субдукции, спрединга) океанической коры. Вблизи активных континентальных окраин, островодужных структур и других крупных, современных газопроводящих проницаемых систем могут формироваться в донных отложениях и верхах осадочных отложений газогидратные скопления мощностью измеряемой в единицах метров, аналогичных керну, поднятому скважиной вблизи берегов Гватемалы и, возможно, будут обнаружены в дальневосточных морях Тихого и Индийского океанов.

То есть, в целом проблема практической значимости ресурсов природных газов в виде их твердой составляющей – газогидратов все еще находится в состоянии своего разрешения, несмотря на почти полувековую историю их изучения.

В России аквальное газогидратообразование имеет широкое распространение в пределах морей Северного Ледовитого океана, Берингова и Охотского, а также Черного и Каспийского. Всюду, где проводилось обследование прибрежных территорий, они были выявлены в донных отложениях в ЗВГО. Масштабы скоплений газогидратов незначительные в основном рассеянные акцессорные включения или тонкие пропластки в донных осадках. Изученность в целом низкая. Сравнительно крупные подводные скопления газогидратов формируются в ореолах действующих выбросов грязевых вулканов, причем на некотором удалении от вершины конуса выноса. Сопровождающий грязевые выбросы газ в основном метановый, иногда с примесью CO₂. Как на суше, так и в аквальных областях грязевые вулканы наблюдаются в зонах глубоких современных прогибов и впадин. В России они выявлены в Черном, Каспийском и Охотском морях.

Наибольший интерес в области распространения аквальных газогидратов в России вызывает Тихоокеанское побережье Восточной Азии, включая Охотское море.

Поиски газогидратов в Охотском море были начаты еще в 1984 г. Е.В. Захаровым и С.Г. Юдиным. Позже присоединились и другие исследователи. Поиски велись по геофизическим данным, донными пробоотборниками в осадках, по выходам пузырей метана на поверхность и даже визуально из глубоководного аппарата МИР. К 1988-1989 гг. было выявлено 9 участков с донными газогидратами. Мощность отложений с газогидратов по сейсмопрофилям составляла 200-300 м от дна. Выходы метана были приурочены к разломным дислокациям. Одновременно были замерены концентрации метана в придонной воде в водных колонках. Но за время всех этих исследований, проведенных за период 1991-2006 гг., самый мощный слой газогидратов, поднятый гравитационной трубкой, составил всего 35 см.

Позже, в 2003 г. была отмечена активизация потоков пузырей метана, число их выходов возросло вплоть до 200, что авторы связали с усилением сейсмотектонической активности по Сахалино-Хоккайдским системам разломов на западе Охотского моря, подтвержденной Хоккайдским землетрясением с магнитудой 7 баллов и последующими многочисленными подвижками океанической коры сопровождаемых землетрясениями 5-6 баллов в 2010-2012 гг. Одновременно насыщенность метаном воды на глубине 10-12 м от дна увеличилась в 10 раз (впадина Дерюгина).

Особые успехи в исследовании субмаринных газогидратов были достигнуты в конце XX века в морях Юго-Восточной Азии, прежде всего в прогибе Нанкай (Японское море), где на поддонной глубине 207-265 м вскрыто три песчаных прослоя со средней пористостью

36%, с общей мощностью примерно 16 м, поровое пространство которых на 80% заполнено газогидратов. Скважина заложена в зоне субдукции Яванской океанической плиты под континентальную. Вслед за Японией об открытиях газогидратов на дне морей, в основном по данным сейсморазведки сообщили Южная Корея, Китай и Индия. В бассейне Кришна-Годавари у Андаманских о-вов в Бенгальском заливе (Индия) совместно со специалистами США и Европы, в 2006 г. было оконтурено и подтверждено скважинным каротажем и кернами, длиной ~ 1 м крупное скопление газогидратов. Такие же открытия можно ожидать в будущем на всей огромной аквальной, островной территории Японского и Южно-Китайского морей. Особенно в зоне Малайского архипелага (Индонезийская складчатая область), расположенного в Яванской литосферной плите с крайне высокой современной сейсмичностью, стимулирующей миграцию глубинного газа. Одновременно здесь же, в пределах шельфа и на островах, открыто свыше 350 месторождений УВ. Поэтому сомнений в широком развитии здесь интенсивных процессов гидратообразования в придонных отложениях шельфа Тихоокеанской плиты не должно быть. Возможно, что регион активной окраины Юго-Восточной Азии и Океании окажется уникальным в планетарном масштабе по объемам накопления газогидратов и, прежде всего, аквальных моногидратов метана. Но пока его изучение лишь только началось.

Оценивая в целом планетарную изученность газогидратности на суше и акваториях, надо отметить, что она пока еще на слишком низком уровне, особенно в России, но очевидность широкого распространения газогидратов, прежде всего в аквальной обстановке по активным окраинам северного арктического и, особенно, тихоокеанского побережий, сомнений не вызывает.

Геологические ресурсы метаногидратов

Планетарное, преимущественно аквальное распространение газогидратов, их низкая в основном фрагментарная изученность, крайняя разномасштабность выявленных и прогнозируемых в основном по косвенным признакам объектов их накопления предопределили широкий интервал оценок их ресурсов в мире – до 10^{15} - 10^{18} м³. Практически все они – 96-98% приходятся на долю осадочных отложений Мирового океана. По отдельным регионам мира есть и более детальная информация. Так в акватории бывшего СССР (в основном в России) содержится около $3,0 \cdot 10^{16}$ м³ гидратного газа (по мнению А.А. Трофимука, Н.В. Черского и др.). В криолитозоне России по оценкам В.С. Якушева во внутримерзлых скоплениях ресурсы газа в основном в нестабильных газогидратов составляют $1,7 \cdot 10^{13}$ м³. Департамент Энергетики США оценивает свои ресурсы газа в

газогидратах в $5,7 \cdot 10^{15} \text{ м}^3$, а Газовый исследовательский институт США в $9,05 \cdot 10^{15} \text{ м}^3$ (2006 г.), что на порядки больше, чем запасы технически извлекаемых природных газов США (по балансу на 2009 г. – $6,9 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$).

В Канаде, по осторожным оценкам, при сравнительно детальной изученности субмаринной газогидратоносности, подтвержденной кернами и скважинным каротажем, суммарные ресурсы метана в газогидратах на континентальном шельфе и районах вечной мерзлоты составляют $(0,44 \div 8,1) \cdot 10^{14} \text{ м}^3$ [Аксельрод, 2009]. Этот объем располагается (м^3):

дельта р. Маккензи – море Бофорта -	$(0,24 \div 8,7) \cdot 10^{13}$;
Арктический архипелаг	- $(0,19 \div 6,2) \cdot 10^{14}$;
Атлантическая окраина	- $(1,9 \div 7,8) \cdot 10^{13}$;
Тихоокеанская окраина	- $(0,32 \div 2,4) \cdot 10^{13}$.
Традиционные запасы газа на 2011 г. –	$1,76 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$.

В Японии, в прогибе Нанкай общие ресурсы метана в газогидратах оцениваются в $6 \cdot 10^{13}$. Два участка изучены более детально. Первый, в интервале глубин моря 945 м, где на поддонной глубине 207-265 м прогнозируется гидратное скопление, содержащее $1,21 \cdot 10^8 \text{ м}^3$ газа, и второй при глубине Японского моря 0,8-1,0 км, вблизи дна, в 30 км севернее Дзёцу с ресурсами $1 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$. Традиционных запасов газа на суше в Японии практически нет, поэтому газогидраты в Японии рассматриваются как реальный источник газоснабжения на 10 лет, а в перспективе – на 100 лет.

В Китае в 2007 г. сообщили о запасах газа в газогидратах $> 100 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ на севере Южно-Китайского моря. Традиционные запасы газа в Китае на 2011 г. составляли $3,04 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$.

В Индии суммарный объем газа в газогидратах в целом оценивается в основном по косвенным признакам в $1,9 \cdot 10^{15} \text{ м}^3$, из них около $5,5 \cdot 10^{13} \text{ м}^3$, установлено в Бенгальском заливе у его восточного побережья.

Традиционные запасы газа в Индии на 2009 г. – $1,08 \cdot 10^{12} \text{ м}^3$.

Возможно, что регион активной окраины юго-восточной Азии и Океании, который развивался в кайнозойский этап тектоногенеза, окажется уникальным в планетарном масштабе по объектам накопления газогидратов, но пока его изучение только началось. В целом, для всей этой огромной острово-дужной системы на стыке четырех планетарных структур – Тихоокеанского и Индийского талассократонов древней Австралийской платформы и мощным юго-восточным массивом Азиатского континента характерны:

- крайне высокая сейсмическая активность;
- множество действующих вулканов (400) как на суше, так и в акватории;

- частые, по существу непрекращающиеся землетрясения, связанные с подвижками литосферных плит, в т.ч. современные высокобалльные (6-8 баллов по шкале Рихтера);
- разновозрастная складчатость – от байкальской до антропогена, с множеством дислокаций.

Одновременно здесь же, в пределах шельфа и на островах, оконтурено более 12 НГБ, открыто и разрабатывается свыше 250 месторождений, в основном нефти, в том числе гигант по запасам – Минос, но есть и газовые (Арун – 391 млрд. м³). Продуктивен преимущественно кайнозой, в прогибах и впадинах. Сомнений в широком развитии интенсивных процессов гидратообразования в осадках и придонных отложениях шельфа не должно быть, основание - теплые моря с богатой органикой и, следовательно, с активной газогенерацией метана из ОВ. Термическую стабильность для газогидратов обеспечивает океан, воды которого быстро выравнивают любые избытки тепла.

Открытым остается лишь вопрос об основном источнике газа, поскольку здесь он может быть любым – биохимическим придонным; катагенным из недр подвижного и высокогазонасыщенного чехла.

Методически, большая часть приведенных выше и других оценок геологических ресурсов газогидратов (Q) выполнена на тех же теоретических основах, что и ресурсов свободного газа, и это естественно, учитывая их генетическое единство при однотипности процессов преобразования ОВ в ходе диагенеза и зависимость их фазового состояния только от термодинамических обстановок в среде их нахождения.

Расчеты Q газогидратов велись по формуле (1) путем умножения площади гидратосодержащих отложений, в т.ч. ЗВГО (S) на их мощность (h), пористость (n), степень емкостного заполнения пористости газогидратов (p) и коэффициент расширения метана – E при разложении газогидрата, с целью перевода ресурсов Q^{ГТ} в объемный эквивалент свободной фазы:

$$Q = S \times h \times n \times p \times E \quad (1)$$

Максимальная величина E при полном заполнении метаном каркаса кубической решетки молекул воды составляет 164 м³/м³.

Очевидно, что ни один из этих параметров не может быть принят хотя бы с умеренной степенью достоверности при современном состоянии изученности проблемы. Если основываться только на площадях с концентрированными, а не рассеянными объемами газогидратов подтвержденными прямыми наблюдениями, то их субмаринные ресурсы не превысят 10¹⁴ – 10¹⁵ м³ и тоже будут также завышены, т.к. основаны на многих допущениях.

Глобальные оценки геологических ресурсов метана в газогидратах меняются в интервале $2,5 \cdot 10^{16} - 7,6 \cdot 10^{18} \text{ м}^3$ [Гинзбург, Соловьев, 1995].

Для сравнения – начальные ресурсы традиционного газа в мире $\sim 5 \cdot 10^{14} \text{ м}^3$, текущие $\sim 2,5 \cdot 10^{14}$.

Подчеркнем, что рассматривать приведенные выше огромные объемы ресурсов газогидратов как нетрадиционное газовое сырье на краткосрочную перспективу у нас пока нет основания. Основная часть поверхности дна Мирового океана (S) составляющая 361 млн. км² находится в ЗВГО, но лишь 20% этой площади покрыты терригенными осадками (супеси, алевролиты, глины и т.п.) с повышенной биологической продуктивностью и соответственно газогидратоносностью.

Особенно богаты $OB_{орг.}$, т.е. основными газогенераторами, отложения конусов выноса с континентов осадков устьев крупных рек (Амазонки, Ганга и др.), мощностью до 15 км и массивы обрушений осадков шельфа у подножий континентальных склонов в зонах с высокой сейсмоактивностью и дислоцированностью осадочного чехла, обеспечивающих не только накопление биогенного метана, но также миграцию глубинного, катагенного метана с его переходом в твердую фазу при попадании в ЗВГО. Именно этим территориям и принадлежит основной по величине параметр в расчетах ресурсов газогидратов – площадь (S). Умножая ее даже на скромные величины других параметров входящих в формулу (1), мы априори получаем те огромные ресурсы газогидратов, которые указаны выше и отличаются по разным оценкам на 2-3 порядка.

Примерно 26% площади дна Мирового океана покрыто глубоководными пелагическими глинами. Остальную площадь поверхности дна океана занимают смешанные осадки – обломочные, хемогенные, глинистые, мергеливые илы и т.п. [Дядин, Удачин, Бондарюк, 1988] с низкой био- и газопродуктивностью и практическим отсутствием заметных объемов газогидратов.

Все эти и многие другие сведения об объемах газа в газогидратных скоплениях мира на разных его территориях, меняющиеся в интервале 2-3 порядков, приведены автором для иллюстрации не столько огромных масштабов метана, законсервированного в твердом состоянии, в основном в аквальной среде придонных осадочных отложений Мирового океана, сколько низкой их изученностью в целом, поскольку оценивать их ресурсы необходимо дифференцированно, прежде всего как геолого-геохимический феномен, влияющий на самые разнообразные планетарные флуктуации и инженерно-геологические характеристики несущих и прочих свойств грунта, а также и как вид газового сырья, хотя бы

и в отдаленной перспективе, т.е. полезное ископаемое. Поскольку целевое назначение данного обзора - оценка ресурсов газогидратов как нетрадиционного вида газового сырья, то, прежде всего, нужно определить, хотя бы в первом приближении, где и какие скопления газогидратов реальны для освоения, т.е. понимается как кондиции, экономические показатели их добычи и риски, связанные с экологическими последствиями их освоения. Для этого необходимо продолжить их изучение и в первую очередь технологии добычи.

Добыча газогидратов. Вопросы промышленного освоения месторождений **газогидратов** обсуждаются уже многие годы и предлагаются разные гипотетические модели. Особых успехов пока нет, поскольку нет и конкретных представлений о типах скоплений **газогидратов**, которые по условиям залегания и масштабам запасов можно было бы рассматривать как промышленно значимые месторождения полезного ископаемого.

В основе добычи газогидратов, учитывая их свойства, может лежать их диссоциация в пластовых условиях, либо извлечение на поверхность в твердом состоянии. Первые эксперименты по добыче газогидратного газа были предприняты совместными усилиями ряда стран (США, Канадой, Японией и др.) на территории дельты р. Маккензи (Канада) и пока еще они не завершены. Нарушение стабильности условий существования газогидратов, т.е. их диссоциация, может быть получено путем: повышения температуры, снижением давления, химическими ингибиторами или комплексным воздействием. Несмотря на сложность их реализации, особенно в субмаринных условиях, техническая реальность освоения газогидратов в перспективе не исключена. Сравнительно детальный обзор современных опытных методов эксплуатации газогидратов по зарубежным источникам был подготовлен в 2009 г. [Аксельрод, 2009]. Автор обзора отмечает, что основное внимание исследователей последних лет в мире привлекают методы диссоциации газогидратов непосредственно в пластовых условиях.

Для скоплений газогидратов в пределах суши рассматривается в основном их диссоциация с помощью повышения температуры в гидратсодержащем пласте, или при наличии свободного газа, его первоочередной отбор с целью снижения пластового давления и соответственно нарушением термодинамической стабильности газогидратов, а также введение в гидратсодержащий пласт (скважину) ингибиторов, к примеру, растворов солей CaCl_2 , алкоголя (метанола) и пр.

В морских условиях использовать эти же методы принудительной диссоциации газогидратов не только сложнее, но и вряд ли допустимо по экологическим последствиям.

Возможно, что главным препятствием для добычи газогидратов в акватории окажутся не столько технико-экономические факторы, сколько негативное экологическое воздействие на морские биоресурсы, пищевая ценность которых ныне и на будущее явно превышает возможную практическую значимость добычи газогидратов для газоснабжения.

Добыча газогидратов в акватории, а их основные ресурсы и наиболее крупные скопления (>90%) именно там, повторит, только в худшем варианте по экологическим последствиям, опыт добычи сланцевого газа путем гидроразрывов сопровождаемый потерей земельных угодий и источников питьевого и хозяйственного водоснабжения в регионах его освоения [*Горная энциклопедия...*].

При выборе технологий освоения газогидратов необходимо также учитывать легко предсказуемую потенциальную опасность их добычи за счет неизбежных прорывов на поверхность спонтанно образующихся газовых пузырей. Достаточно напомнить, что взрыв на платформе ДН в Мексиканском заливе спровоцировал поднявшийся на поверхность в дизельный отсек на платформе газовый пузырь, возникший из восходящих потоков газа при утечке газонасыщенной нефти из придонного блока скважины с нарушенной герметичностью. Оправдание подобного рода катастроф всегда идентично – «человеческий фактор» - не уследили, не приняли своевременно мер предупреждения. Но, в случае прорывов интенсивных потоков пузырей метана на поверхность, особенно в закрытую атмосферу, нельзя забывать очевидное – взрывоопасность смеси метана с воздухом при его содержании 5-16%.

Литература

Аксельрод С.М. Разведка и опытная эксплуатация месторождений газогидратов (по материалам зарубежной литературы). - Научный обзор, 2009. - С. 98.

Гинзбург Г.Д., Соловьев В.А. О количественной оценке субмаринных газовых гидратов // Геология и минеральные ресурсы Мирового океана. - СПб: ВНИИОкеангеология, 1995. - С. 190-198.

Дядин Ю.А., Удачин Е.А., Бондарюк И.В. Соединения включения. - Новосибирск, НГУ, 1988. - С. 1-101.

Горная энциклопедия. - № 3. - М., 1987. - Мировой океан. - С. 362-363.

Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. – М.: Химия, 1980.

Якушев В.С. Формирование скоплений природного газа и газовых гидратов в криолитозоне. - Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. - М., 2009. – 41 с.

Yakutseni V.P.

All-Russia Petroleum Research Exploration Institute (VNIGRI), St. Petersburg, Russia,
ins@vnigri.ru

GAS HYDRATES - UNCONVENTIONAL GAS SOURCES, THEIR FORMATION, PROPERTIES, DISTRIBUTION AND GEOLOGICAL RESOURCES

An overview of information on gas hydrates in land and offshore deposits as a potential unconventional source of hydrocarbons is provided. The attention to such type of unconventional hydrocarbon resources is associated with the fact that its volume is significantly greater than the volume of other species. The basic properties of gas hydrates as well as geophysical and geochemical conditions that determine the possibility of their formation and preservation in sedimentary strata are analyzed. The assessment of gas hydrates resource in Russia and in the world is presented.

Keywords: gas hydrates, unconventional hydrocarbon source, free gas, gas fields, geological resources, mining technology.

References

Aksel'rod S.M. *Razvedka i opyt'naya ekspluatatsiya mestorozhdeniy gazogidratov (po materialam zarubezhnoy literatury)* [Exploration and trial operation of gas hydrates deposits (based on foreign literature)]. Nauchnyy obzor, 2009, p. 98.

Dyadin Yu.A., Udachin E.A., Bondaryuk I.V. *Soedineniya vklyucheniya* [Inclusion compound]. Novosibirsk, NGU, 1988, p. 1-101.

Ginzburg G.D., Solov'ev V.A. *O kolichestvennoy otsenke submarinnykh gazovykh gidratov* [On quantification of submarine gas hydrates]. Geologiya i mineral'nye resursy Mirovogo okeana. Saint Petersburg: VNIIOkeangeologiya, 1995, p. 190-198.

Gornaya entsiklopediya [Mining Encyclopedia]. Vol. 3. Moscow, 1987, *Mirovoy okean* [World Ocean]. P. 362-363.

Makogon Yu.F., Fomina V.I. *Gazovye gidraty* [Gas hydrates]. Moscow: Khimiya, 1980.

Yakushev V.S. *Formirovanie skopleniy prirodnoy gaza i gazovykh gidratov v kriolitozone* [Formation of natural gas and gas hydrates accumulations in permafrost]. Synopsis of dissertation for the degree of doctor of geological-mineralogical sciences. – Moscow, 2009, 41 p.

© Якуцени В.П., 2013