

© Ю.Ф. Макогон, 2010

Техасский университет, США

ГАЗОГИДРАТЫ. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ

Посвящается памяти В.П. Максимова,
директора Шебелинского ГПУ
в период становления

На основе накопленного опыта охарактеризованы условия, необходимые для количественной оценки наличия гидрата и подсчета ресурса газа в залежи, а также проблемы коммерческого освоения газогидратов, в частности, в Черном море.

Многовековая история человечества характерна борьбой за жизненное пространство на нашей маленькой планете. Интенсивность развития современной цивилизации зависит от множества факторов, но одним из важнейших является качество и объем используемой энергии. За прошедшие сто лет население Земли возросло в 4 раза, а энергопотребление – более чем в 10 раз.

Быстрое развитие мировой экономики и широкое использование энергоемких технологий способствуют активному развитию очередного энергетического кризиса в мире. Природа за сотни миллионов лет накопила огромные ресурсы минеральной энергии – угля, нефти, природного газа, которые за 100–200 лет могут быть полностью исчерпаны. Спекулятивные идеи производства возобновляемого жидкого топлива из пищевых продуктов – большая ошибка современного общества. Для производства одной тонны этанола требуется восемь тонн пищевого зерна или аналогичных продуктов. При гибели миллионов людей на планете от голода недопустимо использовать пищевые продукты в качестве источников энергии для транспорта, экологичность которого сомнительна.

Необходимо изыскивать и использовать новые источники минеральной энергии, а также новые виды энергии – Солнца, океана, ветра, естественной гравитации и др. Девятнадцать лет назад в США, как во всем мире, метан угольных шахт являлся источником высокой аварийности, а сегодня его добыча превысила 12 % потребляемого газа в стране при одновременном повышении безопасности работ.

Одним из перспективных источников являются природные газогидраты, потенциал метана в которых превышает 1.5×10^{16} м³. 97 % газогидратов сосредоточены в Мировом океане.

Несколько десятилетий назад никто не предполагал о наличии огромных ресурсов газа, сосредоточенного в недрах земли в твердом, гидратном состоянии. Сегодня уже выявлено более 230 газогидратных залежей (рис. 1).

В Украине благоприятные условия существования ГГЗ – в Черном море. В данной работе я хочу привлечь внимание специалистов энергетиков и ученых Украины и прилегающих стран к проблемам поисков, развед-

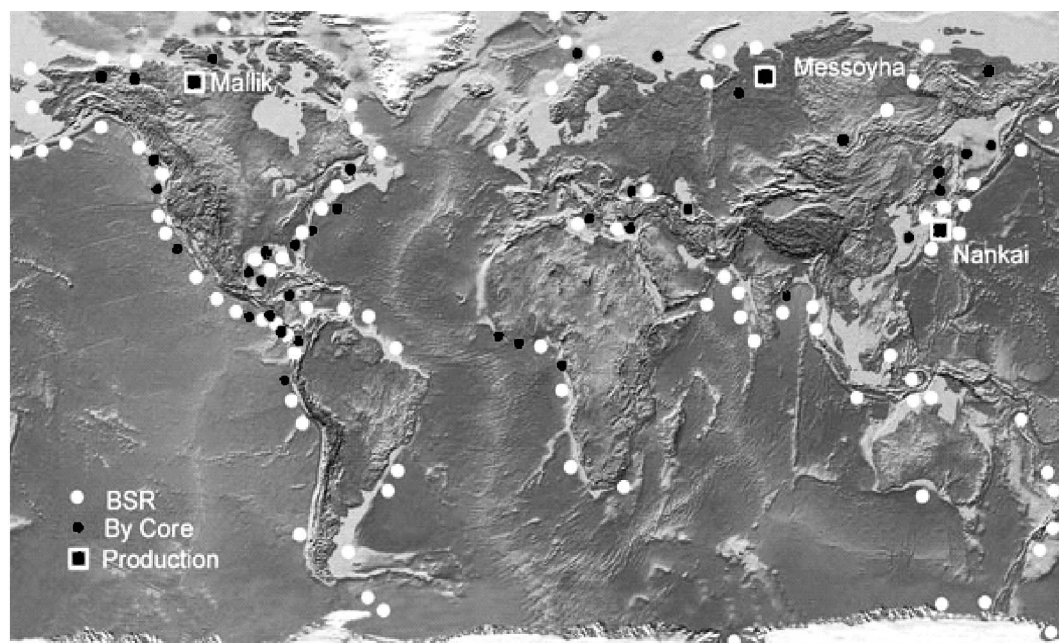


Рис. 1. Карта некоторых выявленных газогидратных залежей

ки, исследований и освоения энергетических ресурсов газогидратов, сосредоточенных в недрах Черного моря. Необходимо создать международный консорциум заинтересованных стран, создать единую скоординированную программу и развернуть совместные работы.

Краткая история изучения газогидратов

Интерес к тому или другому процессу или явлению появляется чаще всего у исследователей случайно, а его углубленное познание идет в зависимости от актуальности и необходимости. Газогидраты не явились исключением.

Природные газогидраты существуют вечно, оказывая серьезное влияние на формирование и сохранение вещества планеты, однако они выявлены случайно.

Гидрат газа впервые был получен Дж. Пристли (1778 г.) при барботаже SO_2 через воду при температуре, близкой к 0°C и атмосферном давлении. Описывая полученные кристаллы, Пристли не назвал их гидратами. Спустя 33 года, аналогичным путем Г. Дэви получил гидрат хлора, и он первый назвал полученные кристаллы гидратом (ошибочно многие его считают автором открытия гидратов).

В то время полученные результаты не привлекли внимания современников, и исследования гидратов не получили серьезного развития. В XVIII-XIX веках было опубликовано всего 25 работ 16-ти авторов. Гидраты не находили применения, их исследования развивались стихийно.

В 1934 г. Гаммершмидт (Hammershmidt) опубликовал результаты исследования газопроводов США, работа которых осложнялась формированием пробок в зимнее время. Предполагалось, что образуются ледяные пробки из конденсатной воды. Опираясь на лабораторные исследования, Гам-

мершмидт показал, что твердые пробки состоят не из льда, а из гидрата транспортируемого газа. Интерес к газогидратам резко возрос. Требовалось детально исследовать условия образования газогидратов, создать эффективные средства исключения осложнений при транспорте. Подобные исследования продолжают до настоящего времени.

Важным этапом в истории исследований газогидратов явилась работа акад. Никитина (1936), в которой он показал, что газогидраты являются клатратными соединениями, в которых молекулы газа заключены в отдельные ячейки, образованные молекулами воды за счет водородной связи. Вскоре на основе рентген-структурного анализа были выявлены две клатратные структуры кристаллов: «I» и «II» (Stackelberg и др, 1949-54), а спустя 45 лет была выявлена и структура «Н» (Ripmeester, 1994). К настоящему времени выявлено более десяти структур газогидратов, существующих при различных давлениях и температурах. Большая часть новых структур выявлена группой ученых Института Неорганической Химии Сибирского отделения РАН.

Третий период в истории исследования газогидратов связан с открытием существования природных газогидратов, которые играли одну из ведущих ролей при формировании планет, атмосферы и гидросферы Земли, но были не известны. Ресурсы природных газогидратов – источник минеральной энергии.

Первое предположение о существовании газогидратных залежей в районах вечной мерзлоты Канады в 1943 г. сделал Д. Катц, профессор Мичиганского Университета, однако доказать их наличие бурением скважин тогда не удалось (Катц, 1982). Повторно, в 1946 г. аналогичное предположение было высказано И.Н. Стрижовым, проф. Нефтяного Института им. Губкина И.М., однако никаких доказательств он не привел. Более того, он высказал пессимизм в целесообразности их освоения. Спустя 17 лет автором данной статьи, после защиты диссертации по газогидратам и визита в Якутию, где в 1963 г. была пробурена Мархинская скважина глубиной 1850 м, вскрывшая разрез пород с температурой 0 °С на глубине 1450 м, была также высказана идея о существовании газогидратных скоплений в охлажденных пластах. Тогда реальность такой идеи у многих вызывала сомнения. Требовались доказательства возможности образования гидратов в реальных пористых средах и формирования газогидратных залежей.

Первые экспериментальные исследования условий образования гидратов природного газа в пористой среде были выполнены автором на кафедре разработки газовых месторождений МИНХиГП им. И.М. Губкина и опубликованы в ж. “Газовая Промышленность” [2]. Полученные результаты убедительно показали возможность образования гидратов в пористых средах, в реальных кернах и явились обоснованием существования газогидратных залежей в недрах земли. Результаты экспериментальных исследований образования и разложения гидратов в реальных кернах были доложены на научной конференции молодых нефтяников в Москве в апреле 1965 г. и отмечены первой премией.

Спустя четыре года, после комплексной международной экспертизы и заключения Президиума РАН, в соответствии с Положением об открытиях

и изобретениях, Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР установил, что граждане СССР Макогон Ю.Ф., Требин Ф.А., Трофимук А.А., Черский Н.В. и Васильев В.Г. сделали открытие, определяемое следующей формулой: «Экспериментально установлено ранее неизвестное свойство природных газов образовывать в земной коре при определенных термодинамических условиях залежи в твердом газогидратном состоянии» (24 декабря 1969 г). Дипломы авторам вручены 4 марта 1971 г.

Одновременно, 24 декабря 1969 г. в Заполярье была введена в промышленную разработку Мессояхская газогидратная залежь. Доклад автора о лабораторных и промышленных результатах на 11-м Международном Газовом Конгрессе в июне 1970 г. вызвал большой международный резонанс. Вскоре в ряде стран были созданы национальные программы исследований и освоения гидратных залежей.

Министр газовой промышленности В.А. Динков утвердил первую национальную программу, но вскоре началась «перестройка», ситуация резко изменилась. Клерки уничтожили программу, гидратная лаборатория ликвидирована. Исследования из Института им. И.М. Губкина полностью были выделены. Россия задыхалась от избытка запасов традиционного газа, гидратам не было уделено должного внимания.

Хорошие идеи не умирают. Надвигался энергетический кризис, исследования были развернуты в лабораториях США, Японии, Канады, Индии, Кореи, Германии и др. Автор открытия, уже будучи пенсионером, в 1992г. принял приглашение одного из крупнейших университетов США, организовал современную лабораторию и успешно продолжает работы, помогая в том числе и исследователям-энтузиастам в России.

Краткая характеристика газогидратов

Все известные газы при определенных давлениях и температурах образуют кристаллогидраты, структура которых зависит от состава газа, давления и температуры. Гидраты могут стабильно существовать в широком диапазоне давлений и температур. Например, гидрат метана существует при давлениях от 20 нПа до 2 ГПа (от $2 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^3$ МПа) и температурах от 70 до 350 К.

Газовые гидраты – соединения включения, в которых молекулы газа заключены в кристаллические ячейки, состоящие из молекул воды, удерживаемых водородной связью.

Для образования гидрата необходимыми условиями являются: наличие газа, воды, определенное давление и температура одновременно. Химические связи между молекулами отсутствуют. Молекулы воды объединены водородной связью, легко распадающейся при понижении давления или повышении температуры.

На Рис. 2 дана диаграмма условий существования гидрата метана в координатах давление-температура,

На Рис. 3 дано фото гидратной пробки, образованной в газопроводе, в океане.

Некоторые свойства гидратов уникальны. Например, один объем воды при переходе в гидратное состояние связывает 207 объемов метана. При этом ее удельный объем возрастает на 26% (при замерзании воды ее удельный

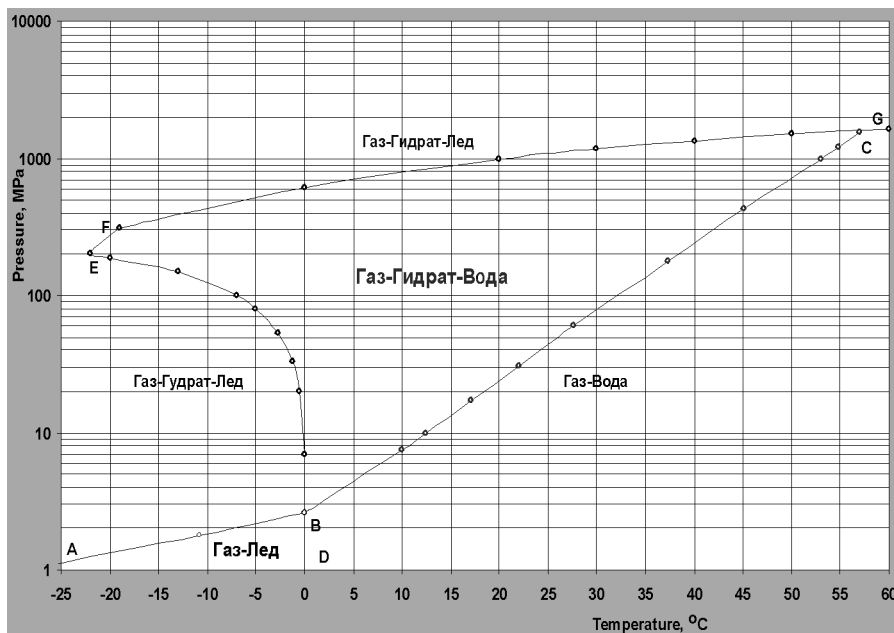


Рис. 2. Существование системы CH₄ – вода в условиях образования гидратов

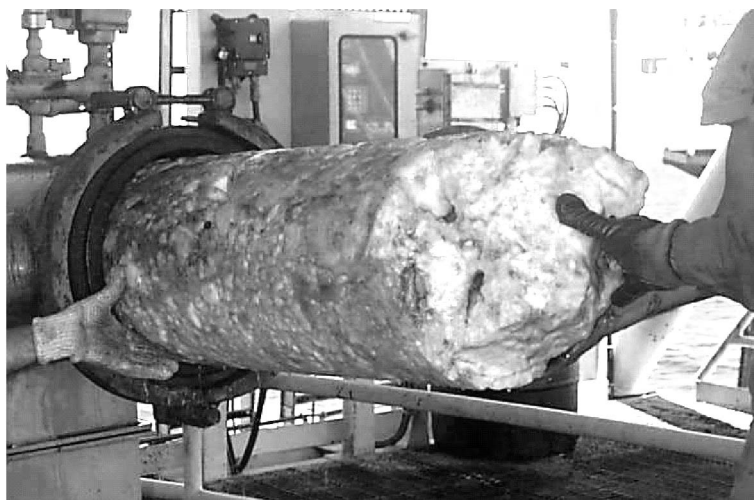


Рис. 3. Гидратная пробка в газопроводе

объем возрастает на 9%). 1 м³ гидрата метана при P=26 атм и T=0 °C содержит 164 объема газа. При этом на долю газа приходится 0,2 м³, на воду 0,8 м³. Удельный объем метана в гидрате соответствует давлению порядка 1400 атм. Разложение гидрата в замкнутом объеме сопровождается значительным повышением давления.

Гидраты обладают высокими электросопротивлением и акустической проводимостью, что позволило создать эффективные средства их поисков и разведки. Они практически непроницаемы для воды и газа, что способствовало сохранности углеводородов в недрах земли во времени. образова-

ние газогидратов происходит с выделением, а разложение с поглощением тепла (Табл. 1).

Таблица 1

Теплота разложения гидратов

Газ	Формула	Плотность, g/cm ³	Уд. объем, см ³ /моль	Теплота разложения	
				T>0 °C	T<0 °C
CH ₄	CH ₄ ·6H ₂ O M=124	0.910	136.264	54.2 kJ/mol 398 MJ/m ³	18.1 kJ/mol
CO ₂	CO ₂ ·6H ₂ O M=152	1.117	136.078	57,5 kJ/mol 422 MJ/m ³	24.3 kJ/mol
C ₂ H ₆	C ₂ H ₆ ·7H ₂ O M=308	0.959	162.669	71.5 kJ/mole 440 MJ/m ³	25.7 kJ/mol
C ₃ H ₈	C ₃ H ₈ ·17H ₂ O M=350	0.866	404.157	129.2 kJ/mol 320 MJ/m ³	27.7 kJ/mol
i-C ₄ H ₁₀	iC ₄ H ₁₀ ·17H ₂ O M=354	0.901	403.996	133.2 kJ/mol 330 MJ/m ³	31.0 kJ/mol

Природные газогидраты

Природные газогидраты – скопления гидратов, сформировавшиеся без участия человека. Такие скопления существуют на Земле и других планетах в космосе. Несмотря на то, что природные газогидраты широко распространены и содержат огромные ресурсы минеральной энергии, их существование было доказано лишь в 60-х годах прошлого столетия [1, 2].

Открытию существования природных газогидратов способствовали опыт борьбы с гидратами промышленными, накопленный на Шебелинском газопромысле, и их познание в лабораторных условиях при работе над первой диссертацией, а также анализ аномальных условий существования залежей углеводородов в криолитозоне после выявления аномальных толщ мерзлых пород в Восточной Сибири. Обычно на стыке двух проблем рождается новая, третья...

Мархинская скважина, пробуренная в 1963 г. на северо-западе Якутии на глубину 1850 м, вскрыла аномальную толщ мерзлых пород – около 1150 м, что более чем вдвое превышало ранее известные величины. Температурный градиент в интервале мерзлых пород не превышал 0.5 °C/100 м, а в подмерзлотной части разреза равен 1°C/100 м, что соответствовало условиям существования газогидратов. Требовались доказательства. Их поиск завершился открытием газогидратных залежей.

Опыт освоения одной из таких залежей – Мессояхской, послужил мощным катализатором изучения и коммерческого освоения газогидратных залежей в мире. Ряд стран создал национальные программы исследования и освоения природных газогидратов. Только в США гидраты изучаются в 15 научных лабораториях. Затраты на исследования газогидратов превысили 1,2 миллиарда долларов. Несмотря на большой объем работ, выполненных в многочисленных лабораториях мира, остаются неизвестными многие базовые проблемы природных гидратов. Залежи природных газогидратов сосредоточены как на материках (3%) так и в Мировом океане (около 97%).

Выявленные свойства гидратов дали возможность сформулировать основы развития методов поисков, разведки и освоения ГГЗ. Были сформулированы критерии выбора территорий для проведения поисковых и разведочных работ. Предложены методы определения глубин залегания ГГЗ, рекомендован метод определения запасов гидратного газа и базовые технологии разработки ГГЗ.

Состав гидратов – величина переменная и зависит от состава исходного газа, давления и температуры. В Таблице 2 дан состав гидратов некоторых залежей.

Таблица 2

Состав гидратов в некоторых ГГЗ (Taylor, 2002)

ГГ месторождение	Состав газа, mol %							
	CH ₄	C ₂	C ₃	i-C ₄	n-C ₄	C ₅ +	CO ₂	N ₂
Hakon Mosby Mud volcan	99.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1		
Nankai Trough, Japan	99.3						0.63	0.07
Bush Hill White, USA	72.1	11.5	13.1	2.4	1	0		
Bush Hill Yellow, USA	73.5	11.5	11.6	2	1	0.3	0.1	
Green Canyon White, USA	66.5	8.9	15.8	7.2	1.4	0.2		
Green Canyon Yellow, USA	69.5	8.6	15.2	5.4	1.2	0		
Bush Hill, USA	29.7	15.3	36.6	9.7	4	4.8		
Messoyakha, Russia	98.7	0.03					0.5	0.77
Mallik, Canada	99.7	0.03	0.27					
Nankai Trough -1, Japan	94.3	2.6	0.57	0.09	0.8		0.24	1.4
Blake Ridge, USA	99.9	0.02						0.08

В исследованиях гидратов четко просматриваются три взаимосвязанных периода: чисто академический – 1778–1934, индустриальный – 1934–1965 и, начиная с 1965 г, энерго-экологический. В течение первого периода, за 156 лет в мире было опубликовано всего 55 работ. С 1934 по 1965 г. опубликована 151 работа. После открытия природных газогидратов интерес к ним резко возрос. За период 1965–2009 гг. опубликовано около девяти тысяч работ.

Определение интервалов глубин залегания газогидратных скоплений

В основу метода определения зоны возможного существования залежей газогидрата положено определение равновесных давления и температуры в разрезе пород. Впервые метод был предложен для суши в 1965 г.

На Рис. 4 и 5 даны диаграммы для выделения интервалов залегания ГГЗ метана и природных газов в районах распространения многолетнемерзлых пород.

На Рис. 6 приведена схема определения интервалов залегания гидратных пластов в акваториях в зависимости от глубины воды, давления и термобарического градиента.

Следует подчеркнуть, что далеко не на всей площади Мирового океана могут существовать газогидратные залежи, пригодные для коммерческого

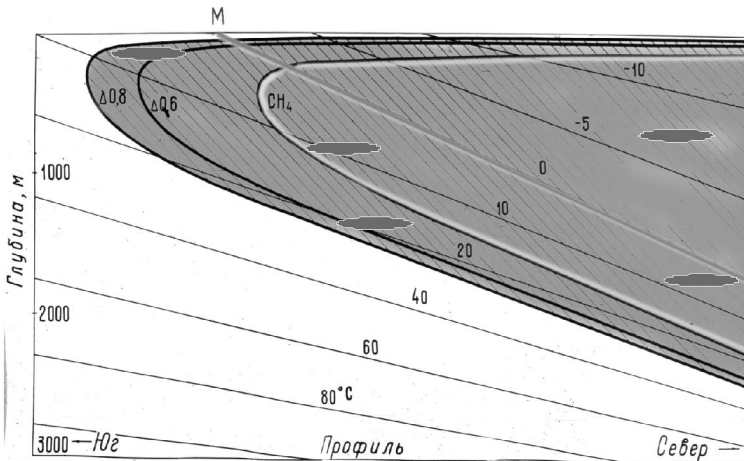


Рис. 4. Диаграмма условий залегания ГГЗ на суше

освоения. Только 9–12 % поверхности Мирового океана являются перспективными для выявления коммерчески эффективных залежей газогидрата (Рис. 7).

Для определения эффективности коммерческого освоения газогидратных залежей необходимо знать не только потенциальные ресурсы, но и величину извлекаемых запасов в конкретных условиях заданного региона.

Извлекаемые запасы гидратированного газа зависят от множества факторов, наиболее важными из которых можно назвать: глубина и размер зоны образования гидратов; удельное содержание гидрата в разрезе пород; толщина продуктивных пластов; размер и степень переохлаждения залежи; суммарные запасы газа в залежи; эффективность применяемой технологии разработки.

При глубинах воды от 0,7 до 2,5 км, что характерно для условий Черного моря, освоение ГГЗ в большинстве случаев может быть эффективным

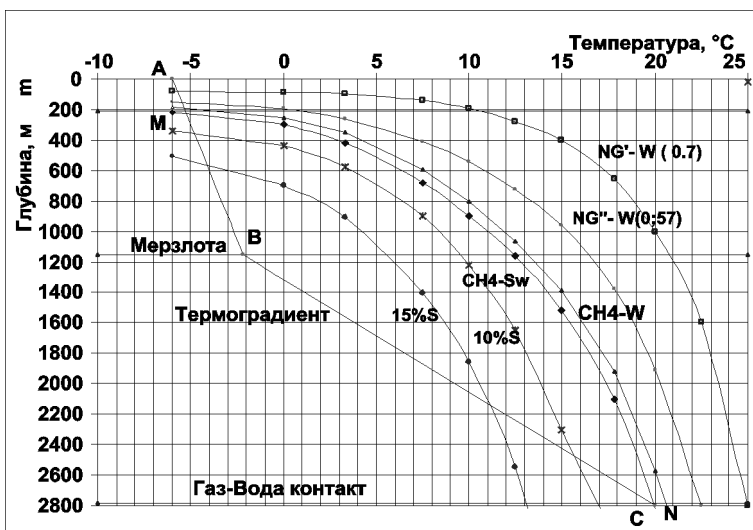


Рис. 5. Диаграмма условий залегания ГГЗ на суше с учетом состава газа и воды в разрезе пород

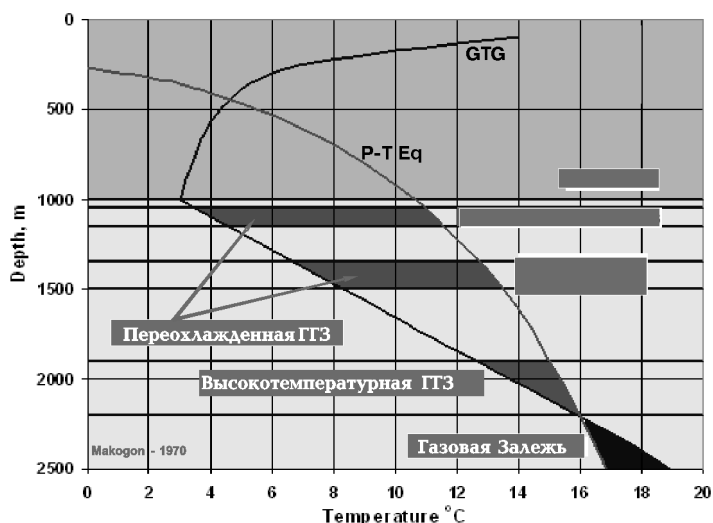


Рис. 6. Схема выделения гидратных залежей в акваториях

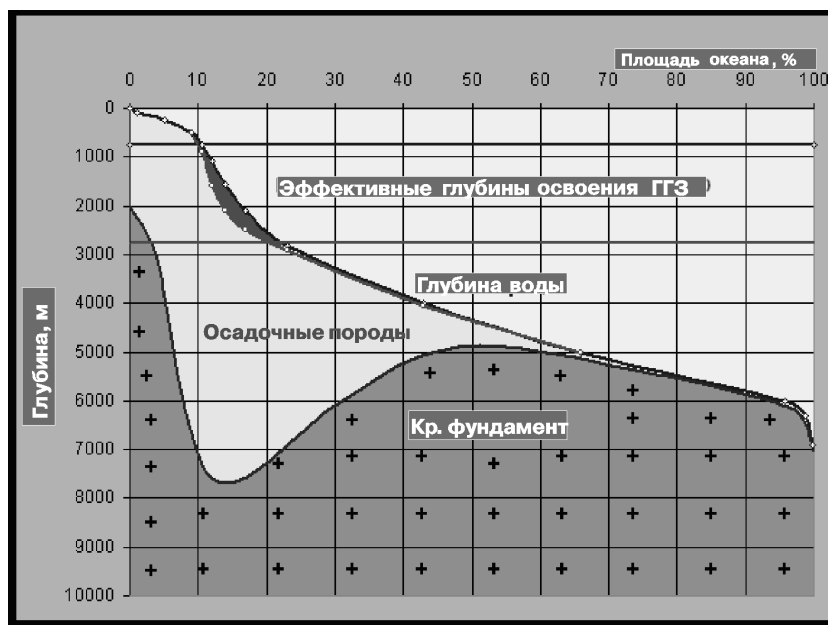


Рис. 7. Осредненный разрез зоны гидратообразования в Мировом океане

при гидратонасыщенности свыше 30–50%. Это вопрос, требующий индивидуального решения для каждого региона, для каждой страны.

Выявление и разведка газогидратных залежей

Природные газогидраты – нетрадиционный источник минеральной энергии.

Без знаний свойств гидратов нельзя создать средства их поисков и разведки, подсчитать запасы, разработать технологию добычи.

Уже в первой серии экспериментов были определены условия образования и разложения гидратов в пористых коллекторах, базовые свойства гидратированных кернов. Установлено, что газогидраты обладают высоким

электросопротивлением [2, 5] и высокой акустической проводимостью кернов (Stol, 1971; 1974). Эти свойства гидрата позволили создать геофизические методы выявления и разведки гидратированных пластов и определения удельной концентрации гидрата в породе. На Рис. 8 дан сейсмический разрез ГГ залежи.

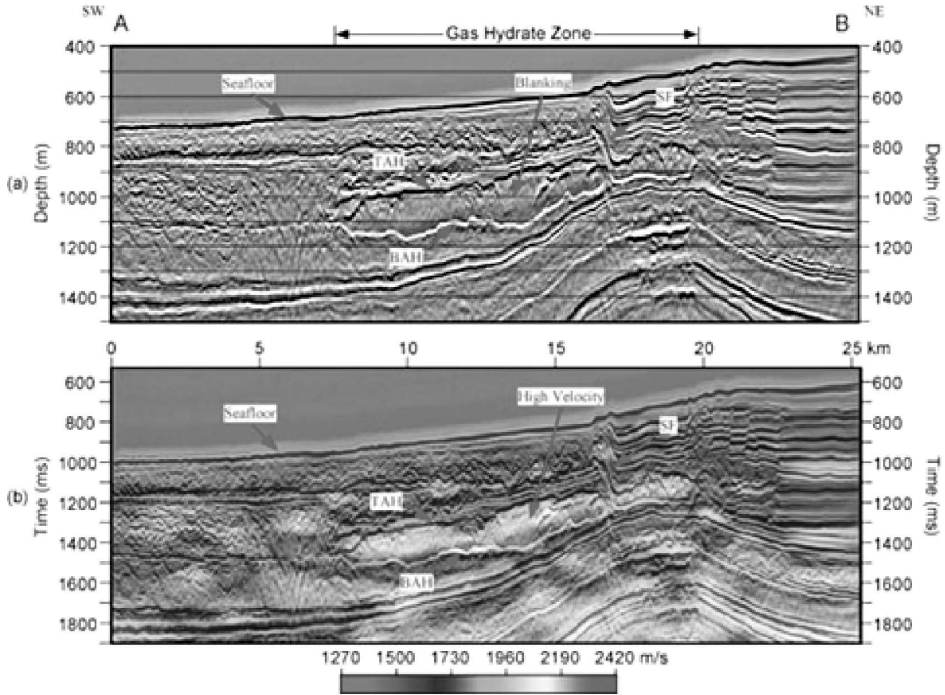


Рис. 8. Геоакустический профиль разреза ГГЗ в акватории

Гидратонасыщенность пород в зоне гидратообразования изменяется в широком пределе от 0 до 100%. Наиболее широко известные данные соответствуют величине 30–70%. На Рис. 9 приведены фото кернов, отобранных в разных районах акваторий. Известны пласты чистого гидрата толщиной до 4 м. На Рис.10 дана каротажная диаграмма скважины, пробуренной в Бенгальском заливе.

К вопросу о ресурсах газа в гидратном состоянии

Вопрос ресурсов газа, сосредоточенного в недрах планеты в твердом гидратном состоянии, ключевой при рассмотрении энергетики будущего, относится к наименее изученным в проблеме природных газогидратов. Генерация газов, формирование, стабильное существование и разрушение газогидратных залежей – процессы, требующие серьезного исследования.

Уже в первых работах по исследованию природных газогидратов была дана методика определения ресурсов газа в гидратном состоянии [2]:

Объем газа в гидратном состоянии определяется выражением

$$V_G = \frac{22400 \cdot V_H \cdot \rho_H}{M_H}, \text{ m}^3, \quad (1)$$

где V_H – объем гидрата, m^3 ; ρ_H – плотность гидрата, g/cm^3 ; M_H – молекулярная масса гидрата, g .

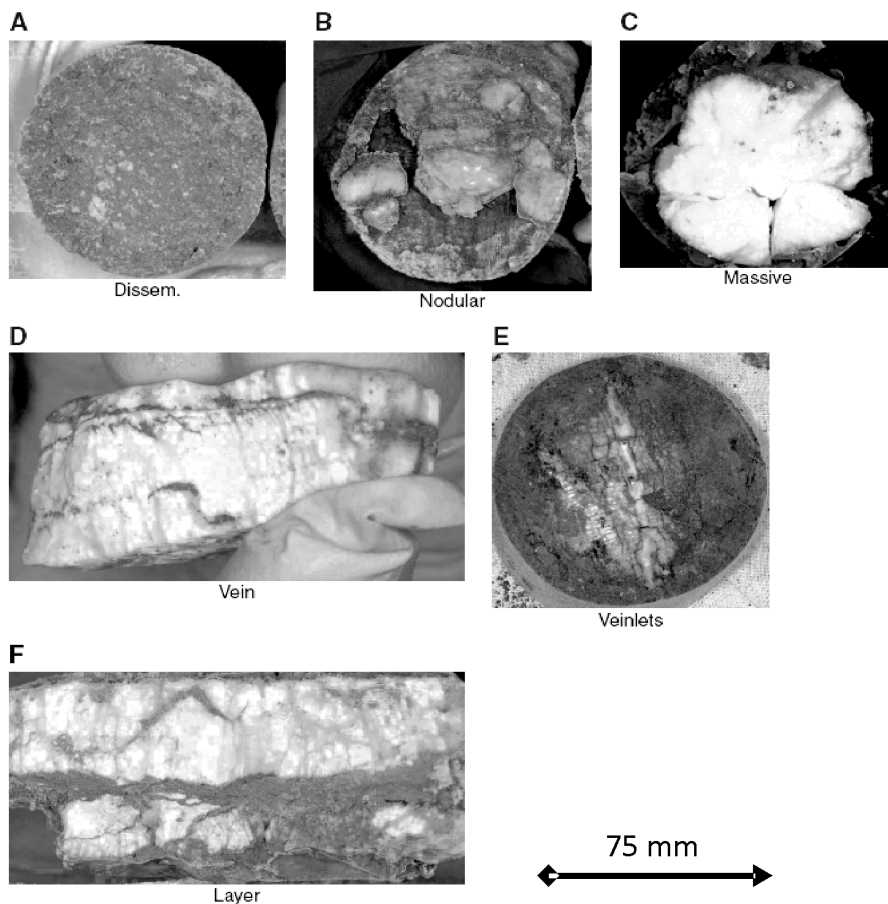


Рис. 9. Типы газогидратных кернов

Газ в газогидратной залежи может находиться в свободном, связанном-гидратированном и растворенном состоянии. Суммарные запасы газа в ГГЗ, Q , m^3 , определяются:

$$Q = Q_G + Q_H + Q_j, \quad (2)$$

где: Q_G – объем газа в свободном состоянии, m^3 ; Q_H – объем газа в гидратном состоянии, m^3 ; Q_j – объем газа в растворенном состоянии, m^3 .

$$Q_G = V \cdot m \frac{PT_0}{P_0T \cdot z} [1 - S_W(1 + S_h V_h - S_h)], \quad (3)$$

где: V – объем залежи, m^3 ; m – пористость вмещающих пород; P – пластовое давление, МПа; T – пластовая температура, К; T_0, P_0 – нормальная температура и атмосферное давление; z – коэффициент сжимаемости свободного газа в залежи; S_W – суммарное содержание поровой воды в залежи; V_h – удельный объем воды в гидратном состоянии, m^3/m^3 , для метана $V_h=1,26$; S_h – часть поровой воды, перешедшей в залежи в гидратное состояние.

Величина S_h всегда меньше 1 и определяется выражением:

$$S_h < (S_W - 1) / (1 / V_h - 1). \quad (4)$$

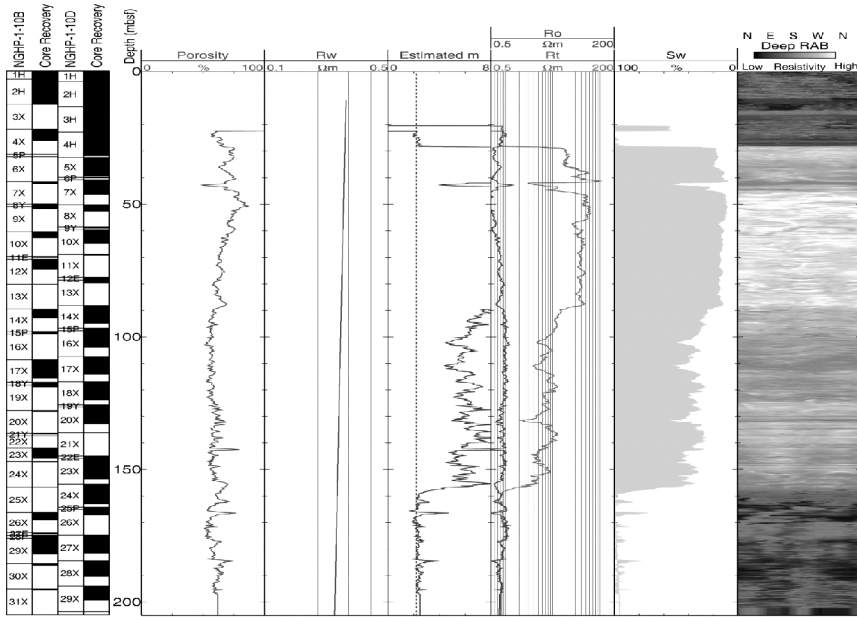


Рис.10. Каротажная диаграмма в скважине ГГЗ Кришна-Годавари

Объем газа в гидратном состоянии в залежи определяется выражением:

$$Q_H = V \cdot m \cdot S_W \cdot S_h \cdot V_h \cdot \Psi, \quad (5)$$

где Ψ – коэффициент реагирования, равный количеству объемов газа (при нормальных условиях), содержащихся в одном объеме воды при их переходе в гидратное состояние.

$$\Psi = 22400/M_h, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (6)$$

Объем газа, растворенного в воде:

$$Q_j = V \cdot m \cdot S_W \cdot (1 - S_h) \cdot \lambda, \quad (7)$$

где λ – растворимость газа в воде, контактирующей с гидратом в залежи, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Наиболее сложным при определении ресурсов газа в гидратном состоянии в залежах является определение коэффициента гидратонасыщенности. Современные методы сейсмоки высокого разрешения позволяют успешно выполнить эту работу.

Данная методика широко используется при подсчетах запасов гидратированного газа в мире. Зная удельное содержание газа в гидратном состоянии, зная интервалы зон накопления гидратов в разрезе пород и их гидратонасыщенность, легко определить потенциальные ресурсы газа.

Определением потенциальных ресурсов занимались многие как геологи, так и эксперты, далекие от геологии, а тем более от вопросов технологий освоения этих ресурсов. Дискуссия о ресурсах продолжается со времени первых публикаций о наличии природных газогидратов до настоящего времени.

Ранние оценки для районов распространения вечной мерзлоты дали величину $37 \times 10^{12} \text{ м}^3$ – в СССР и $57 \times 10^{12} \text{ м}^3$ для мира (Трофимук и др. 1977). Были и другие оценки – $31,1 \times 10^{12} \text{ м}^3$ (MacIver, 1979).

Для мира в целом, включая Мировой океан, где сосредоточено около 97 % газогидрата, на IV Канадской конференции по вечной мерзлоте, проходившей в Калгари в 1981г., потенциальные мировые ресурсы газогидрата были оценены величиной в $1,5 \times 10^{16} \text{ м}^3$ [6]. В дальнейшем были даны уточнения – $1,8 \times 10^{16} \text{ м}^3$ (Квенволден, 1988); и $2,1 \times 10^{16} \text{ м}^3$ (Квенволден, 1999). Важно отметить, что оценки ресурсов имеют большой разброс – от явно заниженных: $0,2 \times 10^{15} \text{ м}^3$ (Соловьев, 2000) до абсурдно завышенных: $7,6 \times 10^{18} \text{ м}^3$ (Добрынин и др., 1981).

К настоящему времени в мире выявлено более 230 газогидратных залежей. Только для Североамериканского континента, по данным Департамента Геологической Службы США (USGS), потенциальные ресурсы газа в ГГЗ, выявленные путем сейсмического зондирования и глубокого бурения с отбором керна и полным комплексом геофизических исследований, превышают несколько тысяч триллионов м^3 (Тэйлор, 2002).

Относительно небольшая ГГЗ Nankai Trough в акваториях Японии при наличии трех пластов общей толщиной 17 м и гидратонасыщении от 40 до 80 % содержит запасы метана более $20,7 \times 10^{12} \text{ м}^3$.

В акваториях Японии выявлено 14 газогидратных залежей.

К вопросу разработки газогидратных залежей

Основным отличием разработки ГГЗ является необходимость перевода в пласте газа из твердого гидратного в свободное состояние с последующим отбором традиционными технологиями (Макогон, 1966; 1974; 1997).

Для эффективного освоения энергии, сосредоточенной в гидратном состоянии, наряду с потенциальными ресурсами гидратного газа важно знать величину извлекаемых запасов газа. Геолого-экономический анализ показывает, что эффективный коэффициент извлечения гидрат-газа в мире составит 17–20 % от суммарного потенциала, т.е. порядка трех тысяч триллионов м^3 . Однако, для отдельных залежей коэффициент извлечения газа может превышать 90 %. Эффективность освоения ГГЗ определяется геологией региона, термодинамической характеристикой разреза пород и используемой технологией. Первые три технологии разработки ГГЗ были сформулированы нами в 1966г. Одна из них успешно используется на Мессояхском месторождении, две другие прошли тестовую апробацию в Канаде и Японии.

Отмечу, при разработке ГГЗ пластовое давление, зависимо от используемой технологии, может оставаться постоянным, понижаться или превышать начальное гидростатическое давление [2].

Из четырех возможных методов разработки ГГЗ опубликованы три: понижение пластового давления ниже равновесного, повышение температуры гидрата в пласте выше равновесной, ввод в пласт катализаторов разложения. 4-й, нетривиальный, но эффективный метод пока не опубликован.

На проблему изучения и освоения природных газогидратов мир израсходовал более 1,2 миллиарда долларов, но пока не предложил никакой новой технологии. Сотни «специалистов» в выжидании. Автор также в выжидательной позиции.

Кратко о ситуации освоения газогидратов в Черном море

Исходная информация: Черное море – уникально по многим характеристикам. Это один из молодых, «закрытых» водоемов, в котором накопи-

лась практически застойная не циркулирующая толща воды, насыщенная сероводородом, с переменным солевым составом по глубине. Средняя глубина моря составляет 1300 м, максимальная – 2210 м. Речные и другие потоки поступающей воды имеют ограниченный сток через узкий Босфор – пролив глубиной 32 м, шириной около 750 м. Перемешивание воды определяется лишь ветрами до малых глубин и маломощными сипами, расположенными на глубинах до 700 м.

Замкнутость бассейна оказала определяющее влияние на насыщенность воды сероводородом, генерацию и динамику углеводородов.

Мощная толща гранулярных осадков 8 – 16 (до 20) км подстилается базальтовой плитой толщиной 5–10 км, опирающейся на мантию. Донные температуры около 9°C. Планктон может существовать лишь в верхнем 200-метровом слое перемешиваемой опресненной воды, содержащей растворенный кислород. На больших глубинах вода насыщена сероводородом, где могут существовать лишь анаэробные бактерии, генерирующие сероводород.

Вертикальная циркуляция воды практически отсутствует. Отсутствует и миграция растворенных газов, генерируемых в верхнем «живом» слое воды, в глубинный сероводородный слой.

Термодинамические условия стабильного существования гидратов в толще воды и осадочных породах для метана существуют на глубине более 750 м. Для сероводорода – от нескольких десятков метров. Нижняя граница существования гидрата метана и сероводорода зависит от глубины воды и величины термоградиента в разрезе пород. На Рис. 11 показана толща пород возможного залегания газогидратных скоплений метана южнее Крыма.

Первые поисковые сейсмические работы в Черном море, выполненные Южморгео РАН (Номоконов, Спивак, 1988) выявили 5 газогидратных площадей (Рис. 12).

Наиболее перспективная площадь находится в 20 км южнее Ялты. Это единственный крупный регион, где Украине следует сосредоточить поиски

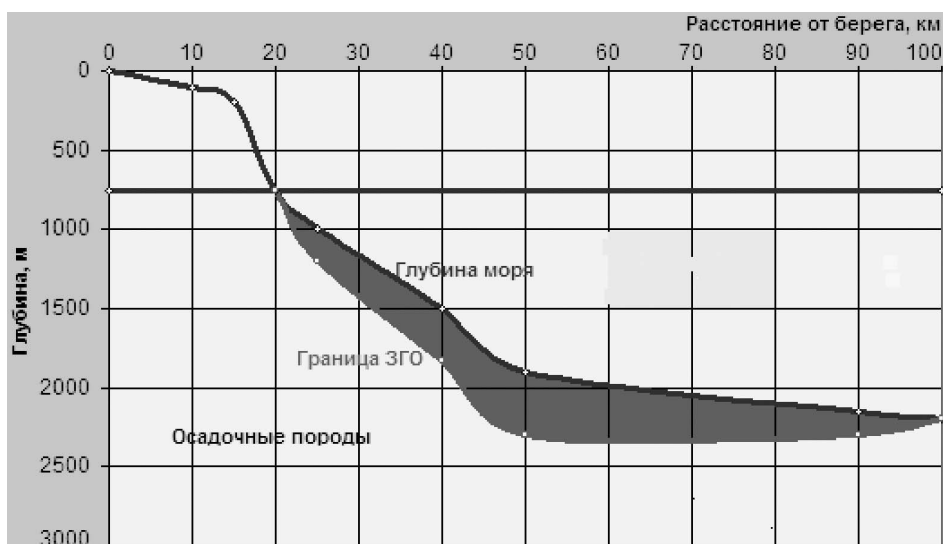


Рис. 11. Зона гидратообразования метана в Черном море (Украина)



Рис. 12. Схема выявленных газогидратных залежей в Черном море

и разведку ГГЗ. Другие перспективные регионы расположены в водах России, Турции и Грузии.

За истекшие годы накопилось много спекулятивных заявлений о запасах газогидрата в Черном море. Такие заявления преждевременны. Необходимо провести комплекс поисково-разведочных работ и только после анализа реальных данных геологии можно определить запасы как потенциальные, так и коммерчески извлекаемые.

Важнейшей особенностью Черного моря является отсутствие накопления органики в донных осадках, что исключает генерацию углеводородов в толще придонных осадков. Данных о генерации и миграции углеводородов в мощной толще осадков в интервале условий гидратообразования нет. Поступающий глубинный газ вероятно является термогенным. Требуются дополнительные исследования. Данные о литологии, структуре, составе, геотермоградиентах в разрезе пород отсутствуют. Исследователи Черного моря уделяли основное внимание припльжным районам, не выходя за пределы глубин по воде более 700 м. Большинство поисковых работ посвящено изучению сипов – «факелов» свободного газа, расположенных в пределах глубин воды от 50 до 700 м (Шнюков, 2009), которые для проблемы газогидратов не имеют значения.

Кроме того, процессы окисления метана в анаэробной толще воды и в придонных осадках превышают процессы генерации метана (Леин и др., 2005). Придонные воды далеки от насыщения метаном, что исключает процесс гидратообразования.

Изучение динамики изотопного состава газов сипов не может раскрыть условия накопления газогидратов в осадочных породах. Термогенные, глубинные газы, поступая в свободном состоянии в толщу воды, не отражают процессы, происходящие в толще пород. Согласно данным о температуре придонных слоев на глубинах воды более 750 м, генерируемый сероводород

должен образовать гидрат. Гидрат метана в виде микрокристаллов, образующихся на поверхности пузырьков газа, всплывает и достаточно быстро растворяется в толще воды. Кристаллы гидрата сероводорода могут накапливаться в придонных осадках. Их плотность выше плотности воды и плотности гидрата метана, но они так же не будут стабильными напластованиями большой мощности у дна вследствие их активной растворимости в воде.

Количественные оценки наличия гидрата в толще придонных пород могут быть получены лишь через постановку специальных исследований, включая бурение, отбор и исследование кернов в толще до нескольких сот метров, а не нескольких тысяч миллиметров. Нужны серьезные геолого-поисковые исследования. Динамика процессов в первых десятках и первых сотнях метров придонных пород весьма различна. Анализ накопленного материала в других регионах Мирового океана дает идеи для размышлений, но нельзя в одной публикации поднять все проблемы.

Одно могу сказать – в Украине достаточно грамотных геологов, технологов и ученых, способных решать актуальные проблемы, а политики и бизнес способны оценить энергетическую составляющую газогидратов и реально поддержать как науку, так и производство.

Заключение

Украина – активно развивающаяся держава с высокой потребностью энергии, однако, потребности энергии опережают ее производство.

Украина располагает всеми традиционными источниками минеральной энергии, но далеко не полностью их использует. Давно застопорились разведочные работы на нефть и природный газ. С углублением угольных шахт растет аварийность работ из-за роста содержания метана в углях. В США за последние 18 лет добыча шахтного метана превысила 12 % объема потребляемого в стране природного газа. Многие страны прирастили запасы газа в гидратном состоянии, работая по целевым гос. программам.

Одесская группа специалистов во главе с проф. Смирновым Л.Ф. несколько десятилетий активно предлагает технологии добычи как гидратного, так и угольного метана, но процесс заканчивается успешной защитой диссертаций без последующего внедрения в промышленность.

Автор также неоднократно обращался к руководителям энергетики Украины с предложениями помочь организовать работы по выявлению и освоению ресурсов газа в гидратном состоянии, сосредоточенных в Черном море, но в лучшем случае получал уведомления: «благодарим, даны распоряжения соответствующим службам..., сообщим».

Черное море – удобный плацдарм для разворота работ по изучению и освоению газа в гидратном состоянии. Украине необходима комплексная скоординированная национальная программа изучения и освоения энергоресурсов газогидратов Черного моря. Необходимо создать консорциум заинтересованных стран, прилегающих к Черному морю. Автор готов помочь.

1. *Макогон Ю.Ф.*, 1965. Образование гидратов в газоносном пласте в условиях многолетней мерзлоты Газовая Промышленность, №5. Ст 14-15.
2. *Макогон Ю.Ф.* 1966. Особенности Эксплуатации Месторождений Природных Газов в Зоне Вечной Мерзлоты. Москва, ЦНТИ, Газовая Промышленность. Стр.19.

3. *Макогон Ю.Ф.* 1972. Природные газы в океане и проблемы их гидратов. Москва, ВНИИЭГазпром. Экспресс-Информация, No.11, 43 стр.
4. *Макогон Ю.Ф., Требин Ф.А., Трофимук А.А.* 1971. Обнаружение газогидратной залежи. Москва, ДАН СССР, том 196 (1): 197-206
5. *Макогон Ю.Ф.* Гидраты Природных Газов. 1974. НЕДРА, Москва. 237 стр.
6. *Makogon, Y.F.* 1982. Perspectives for the development of Gas Hydrate deposits. Fourth Canadian Permafrost Conference, Calgary, March 2-6, 1981
7. *Makogon, Y.F.*, 1997. Hydrates of Hydrocarbons, Penn Well, Tulsa, USA, 516 pg.
8. *Makogon, Y.F., Holditch, S.A. and Makogon, T.Y.* 2004. Proven Reserves and Basics for Development of Gas Hydrate Deposits, AAPG, Vancouver.
9. *Makogon, Y.F., Holditch, S.A. and Makogon, T.Y.* 2005 Development of G-H deposits oil and gas J. No. 7-II., and 14-II.
10. *Makogon, Y.F.* 2010. Natural gas hydrates – A promising source of energy, J. Natural Gas Science and Engineering, No.2
11. *Никитин Б.В.* 1936. Газ-Гидраты. Д.А.Н., Н.Х., 227:81
12. *Номоконов В.П., Ступак С.Н.*, 1988 Известия ВУЗ, Геология и Разведка, 3.
13. *Шнюков Е.Ф.* Гидраты Метана в Черном море, (персональная копия, 2009)
14. *Chersky N.V., Makogon, Y.F.*, 1970, Oil and Gas International, Vol. 10 No 8
15. *Davy, H.* 1811. Phil.Trans.Roy.Soc. London. 101.
16. *Hammerschmidt, E.G.* 1934. Formation of gas hydrates in natural gs transmission lines. Ind. Eng. Chem. 26:851-855.
17. *Priestley, J.* 1778-1780. Versuche und Beobachtungen Uber Verrshiedene Gattungen der Luft, Th. 1-3, 3:359-362. Wien-Leipzig.
18. *Von Stackelberg, M.*, 1954. Solid Gas Hydrates. „Zeitschrift Elektrochem“, 58, 104.

На основі накопиченого досвіду охарактеризовано умови, необхідні для кількісної оцінки наявності гідратів і підрахунку ресурсу газу в покладі, а також проблеми комерційного освоєння газогідратів, зокрема в Чорному морі.

Based on accumulative experience, conditions are characterized for quantitative estimating the occurrence of hydrates and calculating the gas resource in an accumulation as well as problems of commercial use of gas hydrates, particularly in the Black Sea.