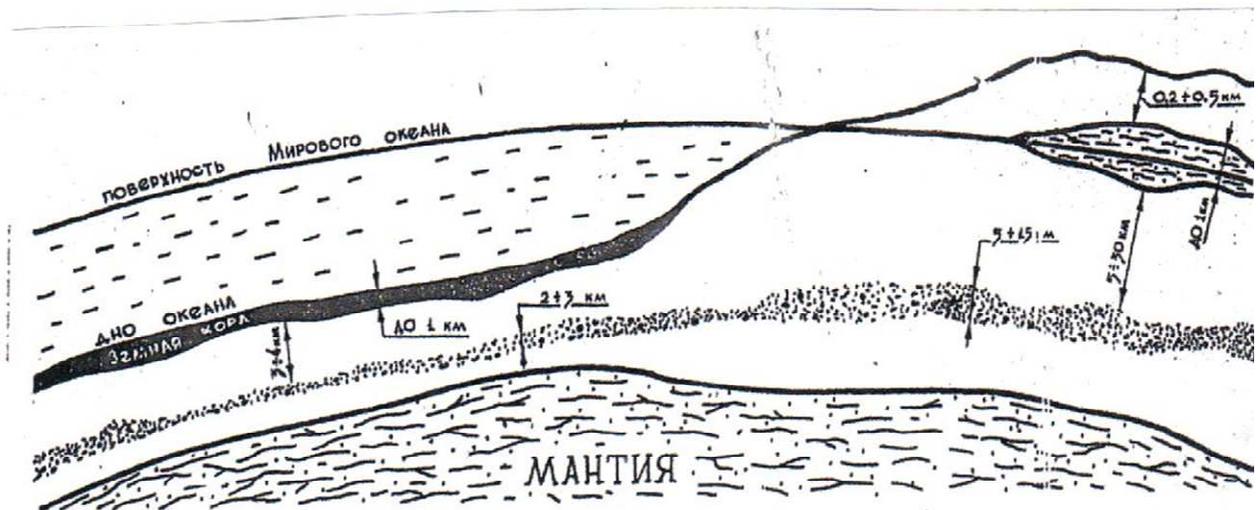


Г.М.Климов, А.М. Климов

**Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии  
для получения теплоты в системах теплоснабжения  
(газогидраты естественного газа)**

Учебно-методическое пособие  
для студентов очной и заочной форм обучения направлений  
08.03.01 «Строительство» и 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»



Нижний Новгород  
2016

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Г.М.Климов, А.М.Климов

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии  
для получения теплоты в системах теплоснабжения  
(газогидраты естественного газа)

Учебно-методическое пособие  
для студентов очной и заочной форм обучения направлений  
08.03.01 «Строительство» и 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Нижегород  
ННГАСУ  
2016

УДК 621.311.23/26:620/9(0.75.8)

Климов Г.М. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии для получения теплоты в системах теплоснабжения (газогидраты естественного газа) [Текст]: учебн.- метод. пос. / Г.М. Климов, А.М. Климов; Нижегород. гос. архитектур. - строит. ун-т - Н.Новгород: ННГАСУ, 2016. – 28с.

Приведены общие сведения о газогидратах природного газа, условиях их образования и залегания в Земле. Кратко рассмотрены возможные способы их промышленной добычи, а также некоторые методы борьбы с их образованием в газопроводах.

Предназначено для студентов и магистрантов ННГАСУ, изучающих предмет «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» и может быть полезно специалистам, связанным с использованием природного газа.

Рис. 10. Табл. 1. Библиограф 10 назв.

Рецензент: А.В.Гордеев, доцент кафедры ТГС

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение.....	4
1. Кристаллогидраты .....	7
2. Гидрат метана как нетрадиционный источник энергии.....	8
2.1 Общие сведения.....	8
2.2 Структура и схема образования гидрата метана .....	9
2.3 Разведка месторождений гидрата метана .....	11
2.4 Способы добычи газогидратов.....	13
2.5 Парниковая опасность.....	15
2.6 Заключение.....	17
2.6.1 Перспективы развития и использования кристаллогидратов (газогидратов) метана .....	17
2.7 Приложение А (справочное) .....	18
ПА.1 Мерзлота как топливо?.....	18
ПА.2 Условия образования газогидратов и примеры ПА.2.3, ПА.2.4.....	21

## Введение

Не часто бывает, чтобы в наше время, когда уже кажется обследован, вымерен и проанализирован состав земной коры, вдруг открыли совершенно новый вид полезных ископаемых. Но такое случилось в последние 10 —15 лет. Речь идет об открытии залежей природного газа, находящегося в твёрдом состоянии.

О том, что природные газы могут образовывать с водой твёрдые соединения — гидраты, — знают давно. Интерес к ним поначалу был чисто познавательным, но так продолжалось только до тех пор, пока гидраты не стали для техники... коварнейшим врагом.

В 30-х годах стали строить мощные газопроводы. Работа их то и дело останавливалась из-за выпадения внутри труб необычного льда, который наглухо перекрывал магистраль. **Это и были гидраты природного газа.**

**Внешне и по своим физическим свойствам они действительно похожи на лед. Каркас кристаллической решетки гидрата построен из молекул воды, соединенных между собой водородными связями. Элементарные ячейки образуют в пространстве многогранники — додекаэдры, полиэдры. Внутри этого ажурного каркаса из шести или семи молекул воды помещается одна молекула газа. Но она не просто заточена в ледяном каркасе, но и сжата с огромной силой. Например, 1 кубометр гидрата может заключать в себе до 220 кубометров газа.**

Для создания подобной конструкции необходимо определенное соотношение температуры и давления. Чем ниже температура, тем меньше для этого требуется давление. Скажем, на тридцатиградусном морозе для гидратообразования в трубе газопровода достаточно всего несколько атмосфер. Воду туда может доставить сам газ, если неважно работает газоосушка, или же она может скопиться в низинных участках после проверки трубопровода на крепость и герметичность, которую обычно проводят нагнетанием воды под сильным напором. И вот тогда молекулы воды могут захватить и заточить в прочный каркас молекулы газа. Очень скоро полутораметровое сечение трубы будет полностью перекрыто. «Замороженный» участок разогревают, пробка начинает разрушаться и её выдувают воздухом. Из отвода трубы при этом вылетают куски мутного, непрозрачного льда.

**Специалисты, которые поначалу были заняты лишь вопросами борьбы с гидратами, стали все чаще задаваться и другим вопросом: почему бы газогидратам не образовываться в недрах естественным путём?**

**И вот в 60-х годах подобрался коллектив геологов, физиков-единомышленников и, как оказалось, будущих авторов открытия.** Началось систематическое и глубокое изучение проблемы. Были поставлены многочисленные эксперименты, в которых

моделировали термодинамические условия глубин земной коры. Они доказывали, что в недрах при температурах от  $-25$  до  $+25^{\circ}\text{C}$  и давлении до 250 атмосфер могут образовываться залежи природного газа в твёрдом гидратном состоянии.

В конце 60-х годов было разведано в Заполярье **Мессояхское месторождение**. По расчётам оно, помимо природного газа в обычном состоянии, должно было содержать и его гидраты. Так и оказалось: газоносный пласт сверху покрывала газогидратная залежь. Когда впервые попробовали закачать в пласт метанол, газовый поток забил из скважин с удесятеренной силой. Так был добыт первый в мире гидратный газ. Начался новый этап исследований, которые должны были дать детальный ответ на множество вопросов. Каков механизм образования гидратных залежей? Где и как их искать? Каким образом добывать?..Как могли возникнуть скопления газогидратов, скажем, на суше? Сегодня ученые предполагают следующий ход событий. Представьте себе такую картину. Где-то на севере сформировался мощный ледник и начал сползать в низкие широты. Громадный ледяной щит 3—4-километровой толщины сдавливает пористые пласты горных пород, нагрузки достигают  $270\text{—}360\text{ кг/см}^2$ . Ледник как бы отжимает из этих пластов и гонит перед собой нефть, воду, газы. Его наступлению предшествует сильное похолодание, недра промерзают глубоко, что способствует образованию в них гидратов. Их залежи леднику разрушить гораздо труднее, мало того, он еще создает благоприятные условия для роста этих залежей, сдавливая породы.

**Когда попробовали рассчитать территорию, на которой расположены газогидратные залежи, оказалось, что она охватывает примерно треть всей суши нашей планеты! В основном это северные районы, где недра проморожены на достаточную глубину. Больше половины территории России лежит именно в этой зоне.**

**Но это еще далеко не всё. Условия, необходимые для образования гидратов, существуют более чем на девяти десятых территории Мирового океана!**

**Механизм накопления здесь, разумеется, иной. Нужное давление обеспечивает толща воды. Температура в её придонном слое составляет всего несколько градусов. Этого достаточно для образования гидратов, так как они могут существовать и при положительных температурах.** Итак, условия выполнены. Дальнейшие рассуждения ученых таковы. На дно постоянно оседают органические вещества — останки морских животных и микроорганизмов. На поверхности дна и в толще осадков они интенсивно разливаются, выделяя метан.

Все это, естественно, бесспорно. Но как должны себя вести пузырьки газа? Что может быть очевиднее предположения, что газ в воде всплывает?! Так и считали до

недавнего времени, рассуждая о возможности накопления гидратов на дне. Эксперименты же выявляют совсем иную картину.

Газы не устремляются вверх, а превращаются в гидраты, кристаллики которых устраиваются в микрополостях рыхлых осадочных пород. Насыщенные гидратами отложения постоянно погружаются, оказываясь под слоем свежих осадков, и через некоторое время опускаются за нижнюю границу зоны гидратообразования. Там гидраты начинают разрушаться. Пузырьки газа, вырвавшиеся из ледяного каркаса, пробираются вверх по лабиринтам трещинок и пор и... снова оказываются в зоне гидратообразования. Так на дне океанов и морей миллионы лет идет процесс накопления гидратов. Месторождения их простираются на тысячи километров. Причем залегают они не глубоко — от нескольких сантиметров до 300—500 метров от поверхности дна.

**Подсчитать точно запасы необыкновенного газа очень сложно. Но приблизительно цифры говорят о том, что их в сотни раз больше, чем нефти и газа во всех разведанных месторождениях!..**

**Как же подобраться к этим несметным и почти не тронутым богатствам?**

Способ для этого, скажем, на суше, вероятно, только один: геотехнологический. Нужно разрушать залежь в недрах и добывать гидратный газ через те же скважины, что и обычный. Для этого необходимо либо сбросить давление в пласте, либо каким-то образом подогреть пласт, либо закачать под землю разрушающее гидраты вещество. Дело это чрезвычайно тонкое. По сути геотехнологи будут иметь в недрах огромный реактор, где идет разложение вещества. Процесс этот нельзя вести ни слишком, бурно, ни замедленно. Иначе легко потерять нить управления и разрушающийся гидрат создаст условия для собственного же нового образования. Бурно разлагаясь, он резко понизит температуру в пласте, компенсирует тем самым падение давления — добыча остановится.

Самыми разными, хитроумными могут быть подземные ситуации в месторождении и вблизи него. И того же они потребуют от добытчиков. Например, под залежью газогидратов течёт горячая подземная река. Её заманчиво подключить к реактору, пробуравив скважину сквозь пласт к водоносному горизонту. Тогда и никаких дополнительных мер для разрушения гидратов не потребуется. Или другой пример: газогидратная залежь часто соседствует с обыкновенной. Здесь опять-таки важно проявить изобретательность, которую природа оплатит щедро...

На океанском дне добыча газогидратов потребует от геотехнологов иных средств. Тут сами необычные условия потребуют необычных же решений. Например, недавно предложен остроумный проект разработки газогидратов с помощью так называемых колоколов.

На дно опускают гигантскую диаметром в несколько десятков метров воронку, связанную трубой с плавучей платформой-защитой. Под воронкой помещают радиоуправляемую машину-рыхлитель, которая разрушает донные породы, заключающие в себе гидраты. Гидраты начинают разрушаться. Пузырьки газа устремляются вверх и, естественно, по мере движения растут в объеме. Чем ближе к поверхности, тем вода в трубе больше насыщена газом. Относительная плотность воды все время падает. Эта разность в плотности создает мощную тягу. Подъемной силы в подобной конструкции с лихвой хватит для того, чтобы увлечь на поверхность куски руды, железомарганцевые конкреции, которыми на большой территории устлано дно океана.

Таким оригинальным способом при разработке морских газогидратных залежей может быть использована энергия всплывающего газа для подъема твердых полезных ископаемых.

## 1. КРИСТАЛЛОГИДРАТЫ

В природных условиях полости в клатратах воды могут занимать молекулы природных газов, образуя кристаллогидраты (**Клатраты - это объединения молекул воды в многогранники, напоминающие по форме футбольный мяч, внутренняя полость которых сравнима по величине как с молекулами воды, так и с молекулами некоторых газообразных веществ, в том числе - метана.**). Наиболее распространенным кристаллогидратом, встречающимся в вечной мерзлоте и на дне морей и океанов, является кристаллогидрат углеводородного газа метана. Он представляет собой массу, похожую на мокрый снег. Такие кристаллогидраты, в принципе, могут использоваться в качестве топлива альтернативного нефти и газу, но, вместе с тем, представляют большую опасность для жизни людей.

Недавно российские ученые Высоцкий и Корнилова провели расчёт энергетических характеристик, необходимых для перехода свободных молекул воды из несвязанного состояния в полость клатрата и обратно. С помощью этих расчетов они показали, что структурой воды - количеством свободных молекул воды в полостях клатратов и вне их - можно управлять с помощью давления, температуры, магнитного поля, причем, "заряженная" таким образом вода сохраняет свою структуру в течение длительного времени и может использоваться для медицинских целей как самостоятельно, так и в качестве "упаковки" для молекул лекарственных веществ. [6]

В целом кристаллогидраты — кристаллы, включающие молекулы воды. Многие соли, а также кислоты и основания выпадают из водных растворов в виде кристаллогидратов. Типичными кристаллогидратами являются многие природные минералы, например, гипс  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , карналлит  $\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Кристаллизационная вода обычно может быть

удалена нагреванием, при этом разложение кристаллогидрата часто идёт ступенчато; так, медный купорос  $\text{CuSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (синий) выше  $105^\circ\text{C}$  переходит в  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (голубой) и  $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (белый); полное обезвоживание происходит выше  $250^\circ\text{C}$ . Однако некоторые соединения (например,  $\text{BeC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) устойчивы только в форме кристаллогидрата и не могут быть обезвожены без разложения [4]

К сожалению, использование кристаллогидратов в качестве источников для получения теплоты находится на невысокой стадии развития на настоящее время (как во всем мире, так и в России)

## 2. ГИДРАТ МЕТАНА КАК НЕТРАДИЦИОННЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

### 2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К теме альтернативных энергоносителей, ещё недавно занимавшей почти исключительно экологов и климатологов, сегодня проявляют интерес уже весьма широкие круги населения, и это вполне понятно: за последние годы мировые цены на нефть и газ выросли в несколько раз, а значит, дорожают и бензин, и топливный мазут, и электричество, следом за ними - и всё остальное без исключения. Эксперты говорят, что это лишь начало, и ратуют за переход в среднесрочной перспективе на альтернативные энергоносители.

В массовом сознании таковыми до сих пор являются исключительно возобновляемые источники энергии - Солнце, ветер, биомасса, морской прибой и тому подобные. Есть, однако, и ещё один весьма перспективный, хоть и не возобновляемый (медленно возобновляемый) энергоноситель: метан с морского дна. Многие о его существовании даже не подозревают, что, в общем-то, простительно: ведь ещё сравнительно недавно об этом не знали и учёные. Между тем, на морском дне хранятся огромные запасы метана! Правда, он находится там в связанном виде - в форме твёрдых гидратов. Впрочем, о механизме происхождения этих гидратов, то есть соединений метана с водой, открытых около 15-ти лет назад, учёные ещё и сегодня знают не так уж много. **Пока очевидно одно - что образование гидратов метана происходит под воздействием высокого давления и низкой температуры, то есть при условиях, вполне типичных для океанских глубин.**

## 2.2 СТРУКТУРА И СХЕМА ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТ МЕТАНА

Образование гидратов метана, то есть его соединений с водой, происходит под воздействием высокого давления и низкой температуры - при условиях, характерных для океанских глубин. Гидрат метана напоминает лёд, или спрессованный снег, который способен гореть, словно газовая горелка, если его поджечь.

**Гидрат метана - это супрамолекулярное соединение метана с водой.**Ниже приведена модель гидрата метана на молекулярном уровне. **Вокруг молекулы метана образуется решётка молекул воды (льда).** Соединение устойчиво при низкой температуре и повышенном давлении. Например, гидрат метана стабилен при температуре 0°C и давлении порядка 25 бар и выше. Такое давление имеет место на глубине океана около 250 м. При атмосферном давлении гидрат метана сохраняет устойчивость при температуре -80 °C [4, стр. 12].



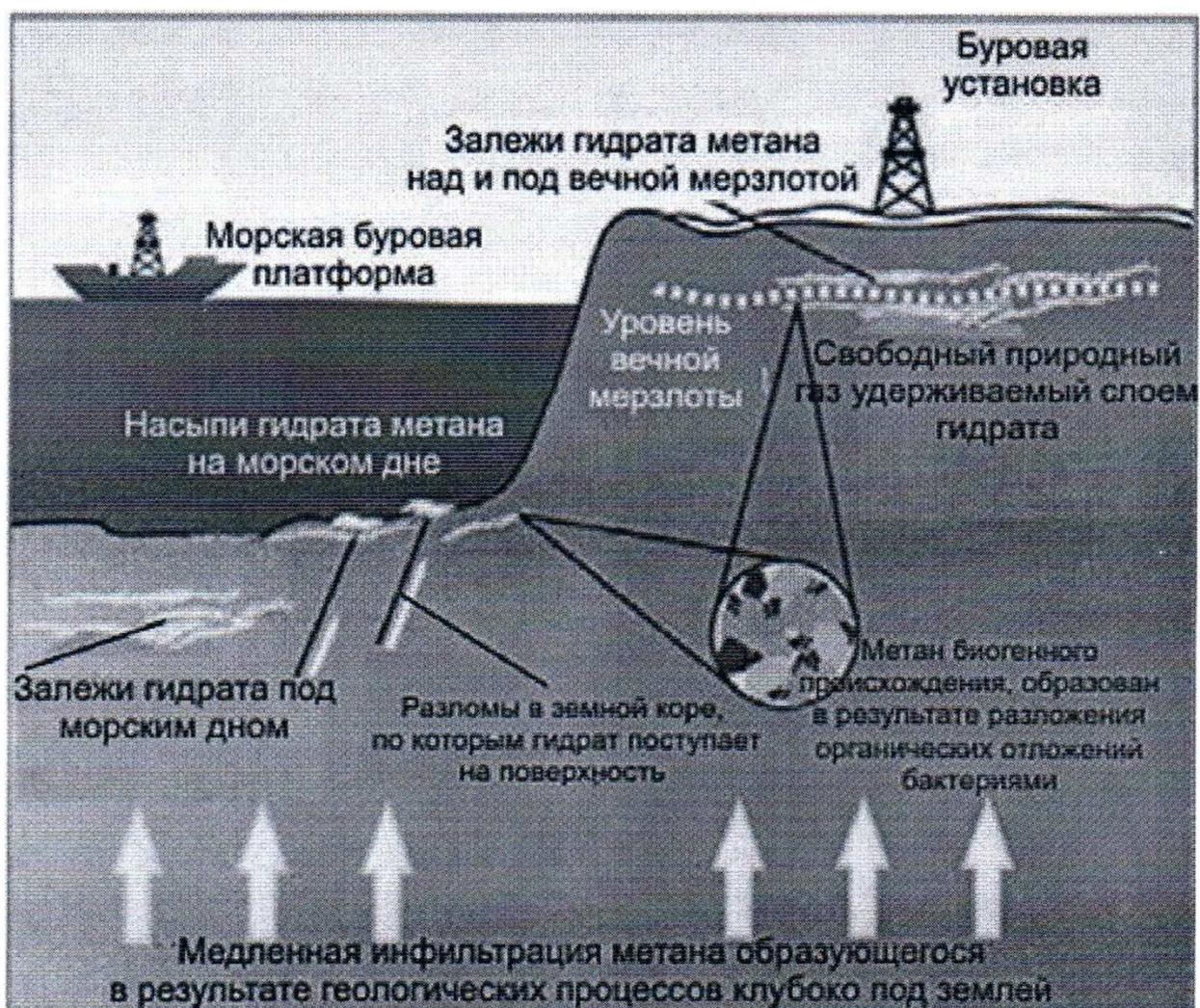
**Рисунок 2. Модель гидрата метана на молекулярном уровне**

Физические свойства океанических гидратов метана изучены недостаточно, в основном, из-за отсутствия технологий, позволяющих сохранить их для исследования в первоначальном виде после извлечения из гидратной зоны.

**Если гидрат метана нагревается, либо повышается давление, соединение распадается на воду и природный газ (метан). Из одного кубического метра гидрата метана при нормальном атмосферном давлении можно получить 164 кубических метра природного газа.**

Давление и температура, необходимые для устойчивого существования в природе гидрата метана, встречаются в районах вечной мерзлоты и на дне океана. Например, условия континентального шельфа у восточного побережья США обеспечивают возможность для существования в природе гидратов метана в верхних слоях морских отложений (на глубине нескольких сотен метров) и практически на всех глубинах, за исключением прибрежных.

Однако твёрдый гидрат не образуется до тех пор, пока концентрация метана не превысит концентрацию насыщения. Только в определенных участках донных отложений концентрация метана настолько высока, что он начинает проникать в пустоты между частицами породы [5, стр.17-22].



**Рисунок 3. Схема образования гидрата метана**

На континентах также существуют условия для образования газогидратов. Однако в континентальных породах меньше воды и меньше порового пространства, в котором формируются газогидраты. Кроме того, температура пород при тех же давлениях намного выше, чем в осадках океанов и морей, в связи с наличием геотермического градиента - роста температуры на 2-3°С с каждой сотней метров глубины. Достоверно известно о наличии газогидратов в Якутии, в зоне вечной мерзлоты, где присутствуют минусовые температуры на глубинах 100 и более метров. Газогидраты образуются на границе мерзлых и талых пород, где достаточно воды и метана, а давление и температура соответствуют необходимому уровню [3, стр.16]. Залежи гидратов метана в районах вечной мерзлоты были обнаружены в Западной Сибири и на Аляске.

Метангидраты могут довольно долго существовать в условиях низких давлений и при более высокой температуре, но обязательно отрицательной — в этом случае они находятся в метастабильном состоянии, их существование обеспечивает эффект самоконсервации — при

разложении метангидраты покрываются ледяной коркой, что мешает дальнейшему разложению.

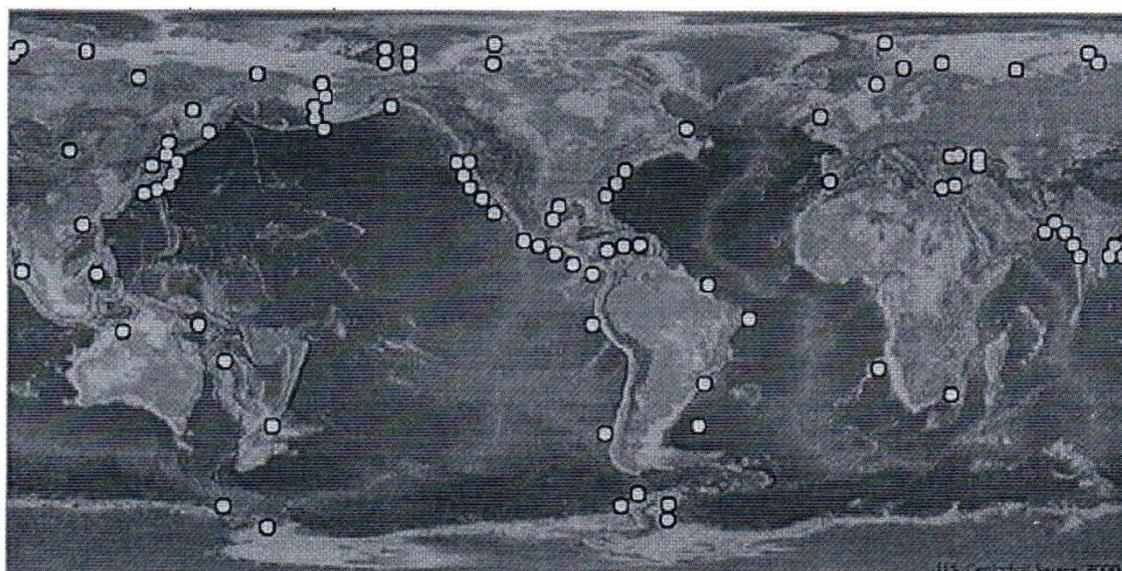
Устойчивость состояния океанических гидратов метана зависит не только от величины давления (глубины залегания) и окружающей температуры, но также от уровня концентрации или растворимости метана в морских отложениях.

## 2.3 РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГИДРАТА МЕТАНА (см рис.3)

Гидрат метана был известен достаточно давно. Его находили как новообразование в стволах скважин, промысловых коммуникациях и магистральных газопроводах. Отлагаясь на стенках труб, гидраты резко уменьшают их пропускную способность. Для борьбы с образованием гидратов на газовых промыслах вводят в скважины и трубопроводы различные ингибиторы (метилловый спирт, гликоли, 30%-ный раствор  $\text{CaCl}_2$ ), а также поддерживают температуру потока газа выше температуры гидратообразования с помощью подогревателей, теплоизоляцией трубопроводов и газоосушкой - очисткой газа от паров воды.

**Природные газогидраты, содержащие метан, впервые обнаружили в СССР. В 1965 г. молодой доцент «Губкинского» института Юрий Макагон заявил о возможности существования газогидратных залежей в природе. Полтора года спустя в Заполярье нашли Мессояхское месторождение, где свободный газ находился под пластом газогидратов. Это достижение было зарегистрировано как научное открытие,**

**Сегодня выявлено более 220 газогидратных залежей.** Распространены они так широко, что их освоение могло бы быть доступно большинству стран. Многие страны приняли национальные программы по изучению и освоению этих месторождений



на планете.<sup>1</sup>

**Рисунок 4. Известные и перспективные места образования гидрата метана**

Глубина залежей гидрата метана может достигать нескольких сотен метров. Основные районы его залежей находятся в зонах вечной мерзлоты на суше и возле океанского дна во многих районах мира.

**Месторождения гидратов метана встречаются в виде рассеянных крупинок или тонких пластов.** Постоянным спутником и источником образования гидратов метана является так называемый «свободный газ», который находится под их залежами. Залежи гидратов метана и сопутствующего им «свободного газа» образуются в пределах верхних 1,5 км отложений морского дна, **при этом эшелон глубины 200—800 метров ниже уровня морского дна рассматривается перспективным для их промышленной разработки.**

Одним из основных и наиболее эффективных методов обнаружения залежей гидратов метана сегодня является акустическое зондирование отложений морского дна. Порождаемая взрывом звуковая волна проходит через толщу воды или части земной коры, отражается от различных геологических структур и возвращается с информацией об их свойствах и особенностях. Если, например, скорость волны, проходящей через породу, резко возрастает, значит, в этом месте мягкая структура превратилась в твердую, и произошло это под воздействием гидрата метана.

С конца 70-х годов в рамках международных океанологических программ начались целенаправленные исследования океанического дна на поиски газогидратов. Для того чтобы рентабельно осваивать месторождения природных газогидратов, необходимо разработать принципиально новые технологии в области разведки и добычи.

Осуществить подобные прорывы могут лишь индустриально развитые страны, ориентированные на долгосрочное увеличение потребления природного газа. В этой связи в 1995-1999 гг. в рамках программы обеспечения энергетической безопасности в ряде зарубежных стран (США, Япония, Германия, Великобритания, Южная Корея, Индия) открыли финансирование национальных научно-технических программ по разведке и освоению прибрежных ресурсов природного газа в гидратосодержащих отложениях. В итоге были обнаружены многочисленные свидетельства наличия газогидратов в придонной части осадочной толщи океанов, преимущественно вдоль восточной<sup>1</sup> и западной окраин Тихого океана, а также восточных окраин Атлантического океана.

**Основные направления поиска газовых гидратов в России сейчас сосредоточены в Охотском море и на озере Байкал[4, стр.28].** Однако наибольшие перспективы

---

<sup>1</sup> По оценкам Департамента Энергетики США, приведенном в журнале «Экосистемы» (электронная версия)

обнаружения залежей гидратов с промышленными запасами связаны с Восточно-Мессояхским месторождением в Западной Сибири. На основе анализа геолого-геофизической информации сделано предположение о том, что газалинская пачка находится в благоприятных для гидратообразования условиях с запасами -500 млрд м<sup>3</sup>.

**В марте 2000 г. российско-бельгийская экспедиция обнаружила уникальное месторождение газовых гидратов в пресноводных придонных отложениях оз. Байкал, на глубине нескольких сотен метров от поверхности воды [4, стр.28].**

Благодаря исследованиям, проведённым в 60-90-е годы, на суше России выявлены такие гидратопроявления, как Ямбургское газоконденсатное месторождение (ГКМ) (реликтовые гидраты), Бованенковское ГКМ (реликтовые гидраты), Улан-Юряхская антиклиналь (стабильные гидраты), район алмазоносной трубки Удачная (стабильные гидраты), а также золотоносные россыпи Колымского района (реликтовые гидраты), Чукотки / (реликтовыегидраты), Буреинского прогиба (реликтовые гидраты).

**По последней оценке ВНИИгаза в России для гидратонакопления благоприятно около 30% территории. Ресурсы природного газа в гидратах континентальной и шельфовой части России оцениваются 100-1000 трлнкуб.м. [7, стр.49].**

## **2.4 СПОСОБЫ ДОБЫЧИ ГАЗОГИДРАТОВ**

Трудности извлечения метана из газогидратов связаны с тем, что месторождения залегают на больших глубинах. Чтобы получить метан надо превратить газогидрат в газ, то есть разрушить его, и отобрать пузыри газа в ёмкости.

**Сейчас рассматриваются только три основных метода вызова притока газа из гидратного пласта: понижение давления ниже равновесного давления; нагрев гидратосодержащих пород выше равновесной температуры; а также их комбинация.**

Все они основаны на применении диссоциации - процесса, в ходе которого вещество распадается на более простые составляющие. В случае с гидратами природного газа диссоциация проходит при увеличении температуры и снижении давления, когда кристаллы льда тают, тем самым, высвобождая молекулы природного газа, заключенные внутри кристалла [7, стр.52 ].Метод понижения давления является пригодным для гидратных пластов, где насыщенность гидратами невелика, а газ или вода не потеряли свою подвижность. Естественно, что при увеличении гидратонасыщенности эффективность этого метода резко падает. Так, при насыщенности пор гидратами более 80% получить приток из гидратов за счёт снижения забойного давления практически невозможно.

Другой недостаток метода снижения давления связан с техногенным образованием гидратов в призабойной зоне вследствие эффекта Джоуля-Томсона. Таким образом, разработка гидратных залежей за счёт понижения давления возможна только при закачке ингибиторов в призабойную зону, что значительно увеличит себестоимость добываемого газа.

**Тепловой метод разработки газогидратных месторождений** пригоден для пластов, имеющих высокое содержание гидратов в порах. Однако, как показывают результаты расчётов, тепловое воздействие через забой скважины малоэффективно. Это связано с тем, что процесс разложения гидратов сопровождается поглощением тепла с высокой удельной энтальпией 0,5 МДж/кг (для примера: теплота плавления льда составляет 0,34 МДж/кг). По мере удаления фронта разложения от забоя скважины все больше энергии тратится на прогрев вмещающих пород и кровли пласта, поэтому зона теплового воздействия на гидраты через забой скважины исчисляется первыми метрами.

**Наибольшие перспективы имеет комбинированный метод, состоящий в одновременном снижении давления и подводе теплоты к скважине.** Причем, основное разложение гидрата происходит за счёт снижения давления, а подводимая к забою теплота позволяет сократить зону вторичного гидратообразования, что положительно сказывается на дебите. Недостатком комбинированного метода (как и теплового) является большое количество попутно добываемой воды.

Кроме вышеперечисленных **существует еще один способ - воздействие ингибитором (веществом, замедляющим химические процессы, реакции).** Некоторые виды спиртов, например этилен гликоль, действуют как ингибиторы при подаче внутрь слоя залегающего гидратов газа, и вызывают изменение состава гидрата. Ингибиторы изменяют условия температуры и давления, способствуя диссоциации гидратов и высвобождению содержащегося в них метана. Однако этот метод вряд ли окажется рентабельным вследствие высокой стоимости ингибиторов.

**Другие предлагаемые методы воздействия, в частности электромагнитное, акустическое и закачка углекислого газа в пласт, пока еще мало изучены экспериментально.**

Недостатки добычи природного газа из слоя гидратов с использованием любого из вышеуказанных методов заключаются в том, что они будут иметь отрицательные последствия для самого слоя гидратов и для окружающей среды.

В слое гидратов под морским дном уже могут иметься неоднородности жесткости осадочных пород, которые могут быть вызваны влиянием гидратов на нормальное образование осадочных пород и уплотнение местных пород. К тому же газ, скопившийся под

слоем гидратов, может находиться под высоким давлением, что может привести к резкому выбросу газа на границе слоя. Такие неоднородности представляют большую опасность для стабильности местного морского дна в случае начала добычи газа из слоя гидратов. Неуправляемое растопление гидрата, возникшее от какого-нибудь сотрясения, может привести к образованию газового пузыря, объём которого более чем в 160 раз превысит первоначальный объём гидрата. Именно высвобождение большого количества газа вызвало в свое время разрушение добывающих платформ в Каспийском море.

Примеры нарушения стабильности уже наблюдались в районах залегания гидратов природного газа у побережья Южной Каролины, США. При проведении сейсмического анализа были выявлены неоднородности в зоне основания слоя гидратов природного газа. В этом регионе плоскость морского дна, наклоненная под углом не более 5 градусов, считается стабильной. Однако здесь имеется множество овражных оползней породы как раз на глубинах под дном, граничащих со слоем залегания гидратов газа. При исследовании одного из наиболее крупных таких оползней длиной 66 км данные сейсмической разведки не подтвердили факт наличия неоднородностей в структуре породы. Это может говорить о том, что именно в этой области гидратов нет.

Некоторые исследователи предполагают, что исчезновение гидратов в этой конкретной области связано с диссоциацией, произошедшей в ледниковый период по причине изменения давления из-за снижения уровня моря. Произошедший вследствие этого выброс мог вызвать этот оползень. Этот пример говорит о том, что диссоциация и добыча природного газа из слоя гидратов в будущем может привести к подобным катаклизмам на морском дне [8, стр.10-16].

## **2.5 ПАРНИКОВАЯ ОПАСНОСТЬ**

Расчёты показывают, что при использовании описанной технологии количество выработанной энергии в 40 раз превысит то количество, которое придётся затратить на добычу. Сногшибательный экономический эффект налицо. Однако есть одна загвоздка. Вернее, огромная экологическая проблема.

Речь идёт, с одной стороны, о скрытом в гидратах метана колоссальном энергетическом потенциале, а с другой стороны, об огромной опасности, которую эти гидраты могут представлять для климата планеты. Метан, как известно, третий по значимости парниковый газ, то есть газ, приводящий к образованию парникового эффекта и, как следствие, к глобальному потеплению и губительному воздействию солнечной радиации.

Как известно метан играет важную роль в тепловом балансе Земли. Так, концентрация метана в атмосфере примерно в 200 раз ниже, чем концентрация CO<sub>2</sub>. Однако, радиационная активность метана примерно в 21 раз выше, чем углекислого газа. Кроме этого, согласно некоторым прогнозам, в ближайшие 50-60 лет ожидается удвоение его концентрации. В середине прошлого века «парниковый эффект» от метана составлял 6% по отношению к эффекту, даваемому углекислым газом, сейчас он составляет уже 10%, а через полвека может достигнуть 14%. Анализ воздуха, захватываемого полярными льдами, показывает, что современный прирост концентрации метана в атмосфере беспрецедентен за последние 160 тыс. лет. Источники этого прироста неясны. Весьма возможно, что одним из источников служат наблюдаемые и скрытые выбросы метана при разложении природных газовых гидратов. Количество метана, которое таят в себе природные газовые гидраты, в 3 тыс. раз превосходит его количество в атмосфере. Освобождение этого парникового потенциала имело бы страшные последствия для человечества. Потепление может вызвать разложение гидратов, а освобождающийся при этом метан приведет к дальнейшему потеплению. Таким образом, может начаться самоускоряющийся процесс.

Газовые гидраты, расположенные в пределах акватории Мирового океана, внутренних морей и озер, опасений пока не вызывают. При любом развитии событий они останутся стабильными по меньшей мере в ближайшую тысячу лет.

Наибольшую опасность представляют гидраты, которые уже сейчас находятся в метастабильном состоянии (в зонах вечной мерзлоты). Особенно подвержены изменению климата газогидратные отложения континентальных арктических шельфов. Благодаря поднимающемуся уровню моря они омываются водами Северного Ледовитого океана и испытывают повышение поверхностных температур. Количество метана, освобождающегося из этого источника, уже сегодня составляет около 1% всех известных источников атмосферного метана. Для этого источника газовых гидратов критической является температура, выше которой перестает действовать эффект самоконсервации и начинается обвальное разложение газовых гидратов.

Выдвинута интересная и достаточно хорошо аргументированная гипотеза, согласно которой периодические потепления и оледенения на Земле вызваны разложением и образованием газовых гидратов. В целом решение проблемы взаимосвязи климат — газовые гидраты находится сегодня в зачаточном состоянии.

Гидраты метана - важное вещество приповерхностной геосферы. В отличие от большинства других это вещество крайне чувствительно к изменениям внешних параметров среды. Небольшое изменение температуры или давления может привести к превращению

прочно сцементированных гидратосодержащих пород в разжиженную массу и к освобождению огромных количеств газа, делающего этот процесс необратимым. Инициаторы таких процессов могут быть самые разнообразные. Это вулканическая деятельность, понижение уровня Мирового океана, повышение температуры у основания зоны стабильности за счет продолжающегося процесса седиментации и, наконец, деятельность человека.

Газогидраты подвергают опасности основания прибрежных структур. С процессами диссоциации гидратов теперь связывают наблюдающиеся во многих районах Земли подводные оползни, осадочные блоки и обвалы. Этим же объясняют действие подводных грязевых вулканов в Каспийском море и побережье Панамы. Еще одно проявление гидратов - выбросы газа в окрестностях острова Беннетта (Новосибирские острова) и в Охотском море. В последнем случае выбросы обусловлены газовым фонтаном, бьющим на глубине 770 м [8, стр. 16-25].

## **2.6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

### **2.6.1 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДОБЫЧИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГИДРАТОВ МЕТАНА**

На сегодняшний день добыча метана в промышленном масштабе из газогидратных залежей нигде в мире не ведётся. Однако, когда энергетические нужды цивилизации востребуют разработку газогидратов, тогда появятся и соответствующие технологии и значение нефтяного топлива начнёт сокращаться. В результате ряд стран, например, США, Япония и Индия, полностью освободятся от импортной зависимости в сфере энергетики. Этот фактор окажет существенное влияние на перераспределение ролей в политике и, как следствие, в международной обстановке в целом.

Что же касается России, то существуют совершенно конкретные цифры, связанные с масштабами залежей газогидрата. Ещё пять лет назад представители «Газпрома» заявляли, что, используя новые методы газодобычи, способны увеличить её в 50 раз, то есть до 1400 триллиона кубометров. **Исследуя технологии добычи, российские учёные пришли к главному принципу - газ из твёрдого состояния в свободное должен быть переведён непосредственно в пласте. Такой перевод можно осуществить снижением пластового давления, повышением температуры или вводом в пласт антигидратных жидкостей - растворов солей, спиртов.** Но пока разработка месторождений сопряжена со значительными техническими трудностями и дополнительными материальными затратами, ибо контролировать и влиять на давление и температуру пласта весьма сложно.

Пока что существует один, весьма оригинальный и деликатный способ «изъятия» газа из вечной мерзлоты, как в Якутии, или с морского дна, как в Охотском море. Чтобы получить газообразный метан из твёрдых газогидратов, их нужно расплавить, то есть нагреть. Один из проектов предполагает прокладку специального трубопровода с платформы на поверхности моря до залежей на морском дне. Особенность трубопровода в том, что он состоит из труб с двойной стенкой. Это как бы два трубопровода, из которых один пропущен сквозь другой. По принципу действия это немного напоминает кофеварку. По внутренней трубе подается морская вода, нагретая до 30 - 40 градусов. Газогидрат плавится, при этом выделяются пузырьки метана, которые вместе с водой поднимаются по внешней трубе вверх, к платформе. Там метан отделяется от воды и подаётся в цистерны или в магистральный трубопровод, а тёплая вода снова закачивается вниз, к залежам газогидратов. В настоящее время на Западе идет поиск инвесторов, чтобы реализовать эту идею на практике. Стоимость проекта оценивается в 100 миллионов евро [4, стр.8].

## Приложение А

### (справочное)

#### ПА.1 МЕРЗЛОТА КАК ТОПЛИВО?

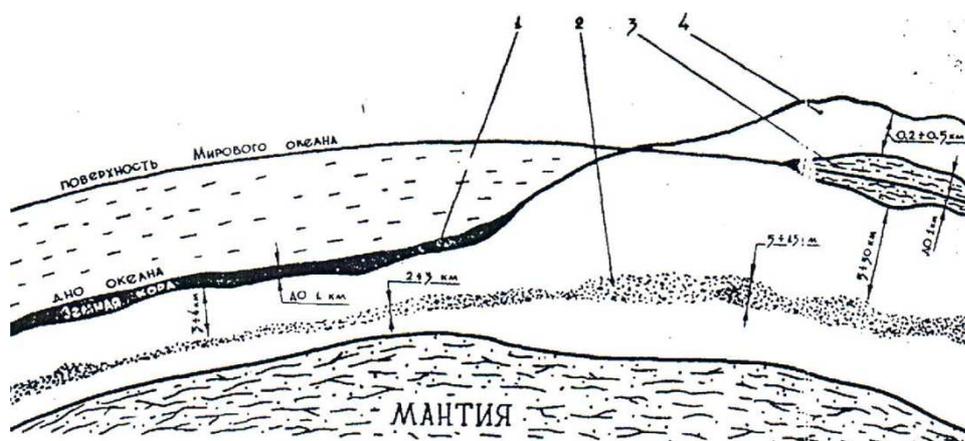
Обнаружили их совсем случайно. По всем расчётам геологов и мерзлотоведов, в недрах должен был залежать газ. Но когда пробурили скважину, его там не оказалось. Приборы обнаружили, что в глубинах залегают какие-то легкие пористые породы. Взяли пробу из скважины, принесли её в тёплое помещение, и тут... раздался взрыв. К счастью, никто не пострадал. Как детективы начали восстанавливать последовательность событий и вспомнили, что это было похожее на лёд белое, быстро таявшее вещество. Потом кто-то неосторожно закурил и...

**Открытие газогидратов сейчас называют, чуть ли не революцией в энергетике. Их запасы просто невероятны - они залегают под третью поверхности суши и почти под всей поверхностью Мирового океана. По предварительным подсчётам, это просто сверхгигантское газовое месторождение. В России газогидратные месторождения занимают площадь 2,4 млн. км<sup>2</sup>, главным образом на северо-западе европейской части России, в Сибири и на Дальнем Востоке. Расположение газогидратов в земной коре показано на рисунке, взятом нами из книги Р. П. Повилейко «Катастрофа» (М, «Недра», 1990). В интересной книге - масса информации об этом топливе будущего.**

**Что же представляют собой газогидраты? [6.7] Внешне они выглядят, как белесые кристаллы. По существу, это замёрзшая вода, вобравшая в себя огромное количество углеводородов. Энергетическая ёмкость их довольно высока — один кубический метр кристаллогидрата включает до  $200 \text{ м}^3$  горючего газа, например – метана [6.7]**

**Ну, а как же технически извлекать эти горючие ископаемые? А может, вообще не нужно поднимать их в том виде, в каком они находятся в природе?**

Привычной ведь уже стала подземная газификация угля. [8] А газогидраты можно непосредственно в недрах превращать в летучие вещества и по трубам доставлять их на-гора. Для разрушения замёрзших газогидратов уже предложены специальные жидкости.



**Взаимное расположение в земной коре нетрадиционных источников нефти и газа (газогидратов)**

На суше запасы газогидратных месторождений уступают обычным газовым. А вот в морских осадках и в подстилающих породах уже на глубине десятков и первых сотен метров их ресурсы легко доступны. Извлекать морские газогидраты предлагается посредством подъёма пульпы при её последующей естественной дегазации. Для этого потребуются макроплатформы и специальные суда, оснащённые трубопроводами.

Чтобы знать, где искать газогидраты, нужно понимать, как они образовались [6...8]. Работы на современных ледниках, бурение ледниковых покровов и толщ под ними позволили приоткрыть тайну их происхождения. Выяснилось, что эти загадочные невидимки - горючие газы, например, тот же метан, - залегают уже на несколько десятков метров ниже раздела «лед - фирн». Вода при замерзании захватывает воздух и он в теле льда погружается, или, как говорят гляциологи, растекается от центра к периферии вместе с ледниковыми слоями. А под большим давлением, при отрицательных температурах и с помощью движущей силы поляризации эти флюиды уже превращаются в гидраты. В Антарктиде такое «превращение происходит на глубинах свыше 700 м, а в Гренландии — с 900 м. Так, в тол-

щах льда и даже подстилающих его породах накапливаются летучие, но замерзшие и отвердевшие вещества. И они перемещаются в соответствии с наступанием или отступанием ледника. При изменении объёмов льда, а значит и давления, флюиды могут смещаться и по вертикали. Перспективными при разведке газогидратов оцениваются краевые зоны ледников, в которые выдавливались эти углеводороды. Газогидраты позволили обнаружить и по периферии древних ледников нефтегазоносные районы. Причем, нефть, как менее подвижный и более консервативный субстрат, связана с древними, палеозойскими оледенениями. Мезозойская зональность определяет более молодые запасы нефти и газа. Так, на территории Европы и Северной Америки в поясе 50-75° с. ш. находится более 90 % всех выявленных месторождений углеводородов. И это не случайно: запасы их были как бы «выдавлены» на периферию древних оледенений в полосу 300-500 км. Вот так из ледниковой теории сложились весьма ценные практические рекомендации для поисковиков-нефтяников.

Такая же картина наблюдается и в Антарктиде. Движение вод, нефти и газа на всех стадиях развития ледникового покрова происходило в направлении шельфа, материкового склона и подножья. Поскольку здесь же проходит и древний вулканогенный пояс, тепловые потоки из недр Земли и сейсмические сотрясения резко увеличили скорость образования углеводородов из органических веществ, их перемещение и накопление. И если на материках всё нефтегазовое богатство следует искать на глубине до 1,5-2,5 км, то на материковом склоне газогидраты располагаются на глубинах 300-400 м под океаническим дном, а уже под ними залегают обычные углеводороды. Для более точных указаний требуется совершенствование методов поиска и разведки.

После обнаружения газогидратов в ледяных или мерзлых толщах и уяснении их огромной энергетической ценности промёрзшие породы стали называть «золотой жилой». Но оказалось, что это не только образное сравнение, а вполне реальный феномен. В условиях вечной мерзлоты, выступая то в качестве окислителей, то в качестве восстановителей, накапливаются различные вещества. Даже такой инертный металл как золото может накапливаться в толще льда. При плавлении «жильного» льда, образующегося при замерзании воды в трещинах мерзлого грунта, глазам исследователей на Севере нередко представляли ажурные конструкции из пленок и нитей золота. Минеральный «скелет» может содержать и другие полезные ископаемые. Их поиск и разведка залежей, наравне с углеводородами, относится к заботам уже немолодой науки - геохимии криолитозоны.

## ПА.2 УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТОВ

Гидраты углеводородных газов представляют собой белые кристаллы, в зависимости от условия их образования похожие на лед или плотный снег.

**Основным условием образования гидратов является наличие взвешенных водяных частиц в газовой среде или полная насыщенность газа.** Каждой температуре влагонасыщенного газа соответствует определенное давление, при котором начинают образовываться кристаллогидраты. На рис. ПА.2.4 приведены кривые образования гидратов во влажном газе для индивидуальных углеводородов. Здесь линии AD— кривые упругости паров индивидуальных углеводородов, линии BC — границы существования гидратов. Левее линии BC находится зона существования гидратов, правее — зона отсутствия гидратов. В точках C отмечаются как бы «критические» температуры существования гидратов. Выше этих температур гидрат не может существовать при любом давлении. Эти «критические» температуры следующие: для н-бутана 1° С, для изобутана 2,5° С, для пропана 5,5° С, для этана 14,5° С, для метана 21,5° С.

Гидраты представляют собой неустойчивые соединения углеводородов с водой. Составы кристаллогидратов различных углеводородов:  $\text{CH}_4 \cdot 0\text{H}_2\text{O}$  или  $\text{CH}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ .

На рис. ПА.2.5 приведены кривые образования кристаллогидратов для чистого метана 1 и природного газа 2 с различной плотностью. Здесь также зона существования гидратов расположена левее кривых, а зона их отсутствия — правее. Из графика видно, что для более тяжелого газа для образования гидратов при той же температуре требуется значительно меньшее давление.

Под атмосферным давлением метановый гидрат разлагается при минус 84,4° С, а этановый гидрат при минус 28,9° С. **Для природного газа, добываемого из газовых месторождений, а также для отбензиненного нефтяного газа температура разложения кристаллогидратов может быть в среднем принята равной минус 74° С (при атмосферном давлении).**

**Плотность метанового гидрата равна 992 кг/м<sup>3</sup>.** В 1 кг гидрата содержится 0,128 кг  $\text{CH}_4$  и 0,872 кг  $\text{H}_2\text{O}$  (считая состав гидрата  $\text{CH}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ). При соответствующих условиях из 100 м<sup>3</sup> метана получается 600 кг кристаллогидратов, объём которых равен 0,6 м<sup>3</sup>, т. е. в 170 раз меньший, чем объём метана.

**Для существования кристаллогидратов необходимо, чтобы парциальное давление водяного пара в газовой смеси было больше упругости паров гидрата.** Если газ насыщен водяными парами, то гидрат может образоваться потому, что парциальное давление водяного пара

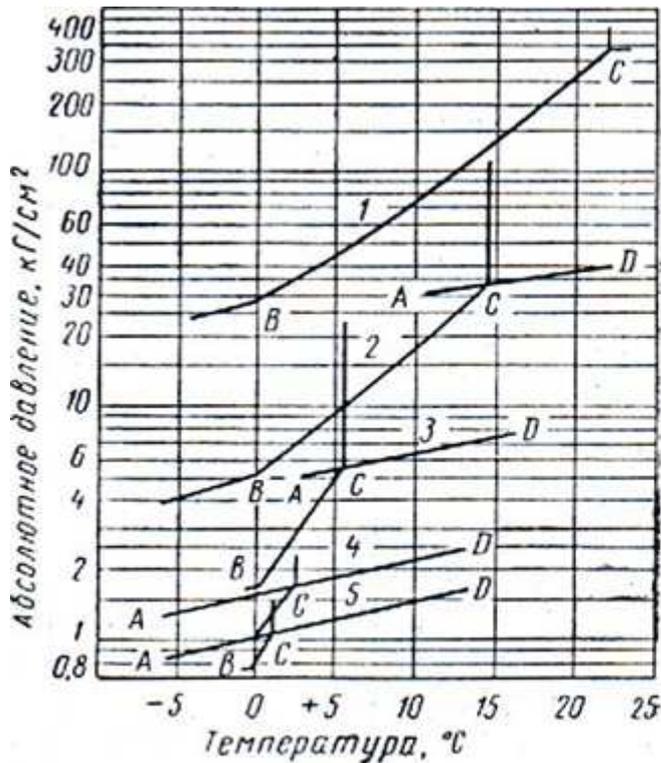


Рис. ПА 2.4 Кривые образования гидратов индивидуальных углеводородов  
1 — метан; 2 — этан; 3 — пропан; 4 — изобутан; 5 — н-бутан.

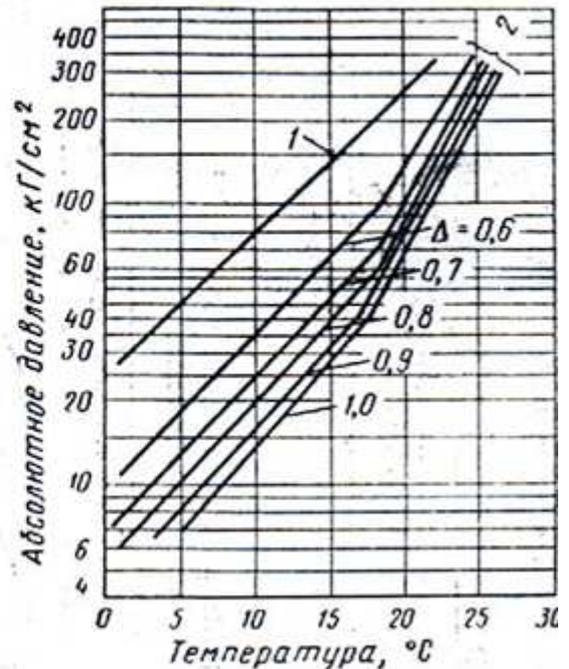


Рис. ПА 2.5 Условия образования гидратов метана и природного газа различной относительной плотности в зависимости от давления.

в смеси значительно больше упругости паров гидрата. Но если снизить содержание влаги в газе до такого значения, что парциальное давление водяного пара станет меньше упругости паров гидрата, то последний не может образоваться.

Но кроме основных условий образования гидратов (давление и температура) имеются и побочные условия, способствующие их образованию. К ним относятся: высокая скорость и турбулентность потока, пульсация (например, от поршневого компрессора), резкие повороты и вообще все факторы, способствующие перемешиванию газового потока. Кроме того, некоторые примеси в газе также способствуют образованию гидратов. На рис.(ПА.2.6) приведено влияние содержания сероводорода в газе на образование гидратов. Из графика видно, что при абсолютном давлении  $50 \text{ кг/см}^2$  для чистого газа температура образования гидратов будет  $6^\circ\text{C}$ , а при содержании 2%  $\text{H}_2\text{S}$  она достигает уже  $10^\circ\text{C}$ . Влияние содержания  $\text{CO}_2$  на образование гидратов приведено на рис.(ПА.2.7.) Это влияние значительно слабее, чем влияние  $\text{H}_2\text{S}$ , и даже содержание  $\text{CO}_2$  в количестве 10% повышает температуру образования гидрата только на  $1^\circ\text{C}$ .

В свое время Гаммершмидт предложил эмпирическую формулу, связывающую температуру и давление образования гидратов для естественного газа,

$$t = 10.633 \cdot p^{0.285} - 17.78$$

где  $t$  – температура в °С, а  $p$  – абсолютное давление ( $\text{кг}/\text{см}^2$ )  $\text{кгс}/\text{см}^2$

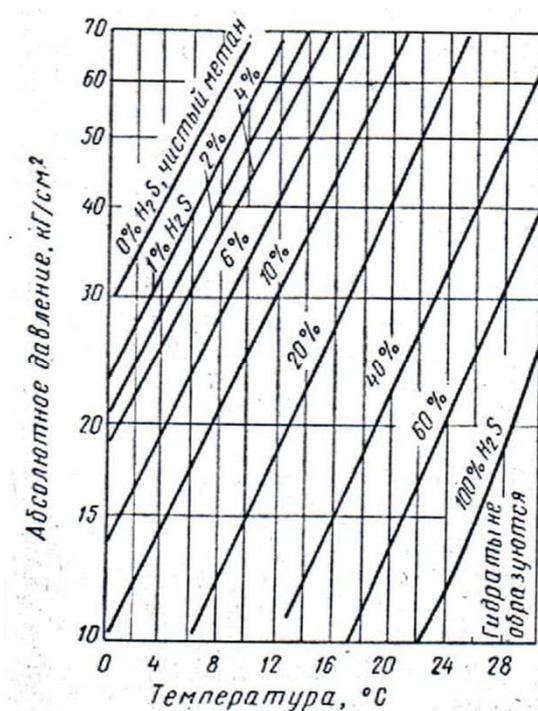


Рис.ПА.2.6. Влияние содержания  $\text{H}_2\text{S}$  на гидратообразование

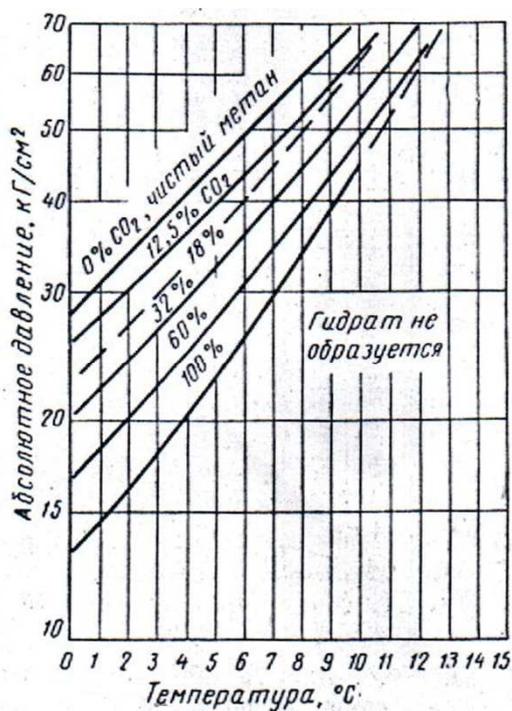


Рис.ПА.2.7. Влияние содержания  $\text{C}_2\text{O}$  на гидратообразование

В. И. Семин провёл эксперименты по определению равновесных параметров ( $t$  и  $p$ ) гидратообразования для месторождений Крайнего Севера на пробах газа из различных скважин.

По полученным данным построена кривая равновесных параметров гидратообразования для газов Ныдинского, Медвежьего, Комсомольского, Губкинского и Мессояхского месторождений. Так как разброс точек оказался незначительным, для практических расчетов им предложена следующая формула:

$$t = 19,9 \cdot \lg p - 28,5, ^\circ\text{C}$$

Для газа Вуктыльского месторождения предложена формула

$$t = 12,25 \cdot \lg p - 8,2, ^\circ\text{C}$$

и для газа Уренгойского месторождения

$$t = 14,7 \cdot \lg p - 11,1, ^\circ\text{C}$$

При абсолютном давлении  $50 \text{ кг/см}^2$  по этим формулам получается, что равновесная температура образования гидратов для Уренгойского месторождения равна  $14^\circ \text{C}$ , а для Вуктылского  $7,5^\circ \text{C}$ . Понижение температуры для последнего объясняется большим содержанием в его газе азота (5,8% против 1,3% в уренгойском газе). В газе Вуктылского месторождения азота содержится на 4,5% больше, чем в газе Уренгойского месторождения, а температура образования гидратов ниже  $6,5^\circ \text{C}$ . Но если учесть то, что в Вуктыльском газе содержится больше тяжелых углеводородов, то можно считать, **что каждый 1 % азота способствует понижению температуры образования гидратов при одном и том же давлении на  $2^\circ \text{C}$ , что подтверждается экспериментальными данными.**

**Начало зоны образования гидратов в магистральном газопроводе будет там, где температура станет ниже температуры соответствующей давлению в газопроводе...**

Газ поступает в газопровод всегда с температурой выше температуры грунта. Только на некотором расстоянии от начала температура газа станет равной (практически) температуре грунта. Следовательно, на каком-то начальном участке движение газа происходит неизотермически.

Изменение температуры газа в действующем газопроводе выражается формулой В. Г. Шухова

$$\ln \frac{t_1 - \tau_{\text{гр}}}{t_2 - \tau_{\text{гр}}} = x,$$

или

$$\Delta t = t_1 - t_2 = (t_1 - \tau_{\text{гр}})(1 - e^{-x}), ^\circ\text{C}$$

где  $t_1$  и  $t_2$  — начальная и конечная температуры газа в газопроводе в  $^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t$  — перепад температуры в  $^\circ\text{C}$ ;  $\tau_{\text{гр}}$  — среднегодовая температура грунта на глубине залегания газопровода в  $^\circ\text{C}$ ;  $e$  — основание натуральных логарифмов ( $e = 2,718$ );  $x$  — показатель теплопередачи,

$$x = \frac{K\pi DI}{q\rho C_p} = \frac{K\pi DI}{gC_p}$$

$K$  — коэффициент теплопередачи от газа к грунту в  $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$ ;  $D$  — наружный диаметр газопровода в м;  $I$  — длина газопровода в м;  $q$  и  $g$  — массовый (весовой) и объемный часовые расходы газа, соответственно в  $\text{кг/сутки}$  и  $\text{м}^3/\text{сутки}$ ;  $C_p$  — средняя весовая теплоемкость газа в  $\text{ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ ;  $\rho$  — плотность газа в  $\text{кг/м}^3$ .

В табл. ПА.2.1 приведены значения  $e^{-x}$ .

$$\text{Средняя температура в газопроводе } t_{\text{ср}} = \tau_{\text{гр}} + \frac{\Delta t}{x}, ^\circ\text{C}$$

На рис. ПА.2.8 приведены данные по изменению давления и температуры в магистральном газопроводе Похвистнево — Куйбышев, здесь же показана зона образования гидратов.

Производительность этого газопровода в период обследования была 27 000 м<sup>3</sup>/ч, протяженность 140 км, начальное абсолютное давление 35 кг/см<sup>2</sup> и конечное 5 кг/см<sup>2</sup>. Начальная температура газа 32° С, точка росы его 16° С. Среднегодовая температура грунта 1,6° С.

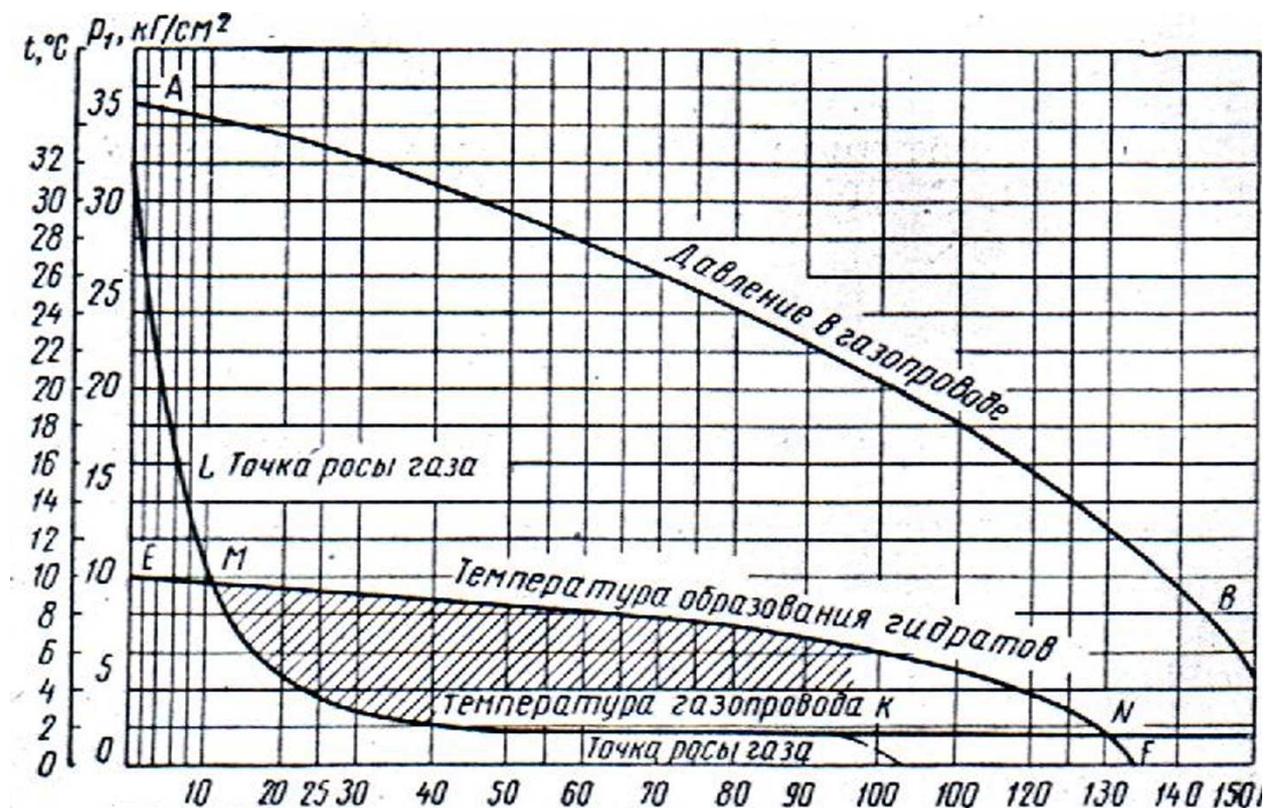


Рис. ПА.2.8. Изменение температуры и давления и зона образования гидратов в газопроводе Похвистнево – Куйбышев.

Плотность газа  $\rho = 0,88$  кг/м<sup>3</sup>, теплоёмкость его  $C_p = 0,5$  ккал/кг, коэффициент теплопередачи грунт — газ  $K = 1,3$  ккал/ч·М<sup>3</sup> -град.

Кривая АВ выражает изменение давления в газопроводе, ее уравнение

$$p_x = \sqrt{p_1^2 - (p_1^2 - p_2^2) \frac{x}{L}}, \text{ кгс/см}^2.$$

Кривая изменения температуры от начала до 40 км происходит по формуле Шухова. Выравнивание температуры газа и грунта происходит на расстоянии 40 км. Так как газ поступает в газопровод ненасыщенным, то в самом начале газопровода влага выпадать не будет. В точке L точка росы газа сравнивается с его температурой, газ становится насыщенным, а дальше уже пересыщенным. Начиная с точки L, т. е. с 7—8 км, начнется выпадение воды.

Таблица ПА.2.1.

Значения  $e^{-x}$ 

$x$	$e^{-x}$	$x$	$e^{-x}$	$x$	$e^{-x}$
0	1,0	0,7	0,4966	1,8	0,1653
0,1	0,9048	0,8	0,4493	2,0	0,1353
0,2	0,8187	0,9	0,4066	3,0	0,0498
0,3	0,7408	1,0	0,3679	4,0	0,0183
0,4	0,6703	1,2	0,3012	5,0	0,0067
0,5	0,6065	1,4	0,2466	6,0	0,0025
0,6	0,5488	1,6	0,2019	7,0	0,0009
				10 и более	0,0000

В первых 11 км температура образования гидратов при соответствующих давлениях в газопроводе ниже температуры газа, и гидраты образоваться не могут. Зона от точки М до точки N есть зона возможного образования гидратов. Практически выпадение гидратов прекратится раньше, когда газ станет уже ненасыщенным вследствие сильного понижения давления. Точка росы, начиная с точки L, будет все время равна температуре газа, а излишняя влага будет выпадать и скапливаться в пониженных местах газопровода. Самое интенсивное выпадение влаги наблюдается вначале, когда давление в газопроводе высокое, так как интенсивно понижается температура газа. При неизменной температуре газа и дальнейшем понижении давления выпадение влаги ослабевает, а при некотором давлении совсем прекращается (точка К). Так как одним из основных условий выпадения кристаллогидратов является наличие воды в капельножидком состоянии, то начиная с этой точки гидраты выпадать уже не будут (точка росы газа ниже температуры в газопроводе).

**Пример ПА2.3.** По данным газопровода Похвистнево — Куйбышев определить, возможно ли выпадение гидратов в 8 км от начала газопровода?

**Решение.** Определим давление в газопроводе в точке на расстоянии от начала 8 км, а затем по рис. ПА.2.8. и температуру образования гидратов.

$$x = \frac{8,0}{140} = 0,057 \quad p_x = \sqrt{36^2 - (36^2 - 5^2)0,057} = 35 \text{ кг/см}^2$$

По графику на рис. ПА.2.8 находим, что для газа с относительной плотностью 0,67 (0,88 : 1,293 = 0,67) температура образования гидратов при абсолютном давлении 35 кг/см<sup>2</sup> равна 12,2° С, т. е. ниже 16° С. Следовательно, в этой точке гидраты не выпадут.

**Пример ПА.2.4** По данным предыдущей задачи определить расстояние от начала газопровода, где начнется выпадение кристаллогидратов.

**Решение.** Это будет в той точке, где температура газа в газопроводе станет равной температуре образования гидратов при данном давлении в этой точке.

Зададимся температурой  $10^\circ \text{C}$  и найдем расстояние этой точки от начала газопровода при температурном перепаде  $32 - 10 = 22^\circ \text{C}$ .

Подставим эту температуру в формулу  $22 = (32 - 1,6)(1 - e^{-x})$ .

Отсюда находим  $1 - e^{-x} = 0,725$ , при  $e^{-x} = 0,275$ . По таблице определяем  $x = 1,3$ .

Теперь определим расстояние от начала газопровода

$$1,3 = \frac{1,3 \cdot 3,14 \cdot 0,273l}{27\,000 \cdot 0,88 \cdot 0,5} = \frac{1,12l}{11\,900}$$

Отсюда

$$l = \frac{1,13 \cdot 11\,900}{1,12} = 13\,700 \text{ м} = 13,7 \text{ км}$$

Найдем абсолютное давление в этой точке  $p_x = \sqrt{36^2 - (36^2 - 5^2) \frac{13,7}{140}} = 34 \text{ кг/см}^2$

По графику (рис. ПА.2.8.) находим, что температура образования гидратов при этом давлении равна  $12^\circ \text{C}$ . Значит выпадение гидратов начинается несколько раньше, примерно в  $12 \text{ км}$  от начала газопровода.

## 2.7 ИСТОЧНИКИ

1. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации [Текст]: федеральный закон:[принят Гос. Думой 11 ноября 2009 г.: одобрен Советом Федерации 18 ноября 2009 г.]. - М.: Ось, 2010. - (Актуальный закон).
2. ГОСТ 7.1 - 2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления [Текст]. - Взамен ГОСТ 7.1-84, ГОСТ 7.16-79, ГОСТ 7.18-79, ГОСТ 7.34-81, ГОСТ 7.40-82; введ. 2004-07-01. М.: Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: ИПК Издательство стандартов, 2004г.
3. Агалаков С.Е. Газовые гидраты в Туронских отложениях на севере Западной Сибири //Геология нефти и газа. - 1997. - №3.
4. Беляев А.М. Гидраты метана - новый энергетический ресурс и экологические проблемы//Наука и техника. - 2007. - №1.
- 5.Гройсман А.Г. Теплофизические свойства газовых гидратов/ А.Г. Гройсман. - Новосибирск:Наука, 1985. - 94 с.
- 6.Делягин Г.Н. Теплогенерирующие установки: Учебник для вузов/ Г.Н. Делягин В.И. Лебедева Б.А. Пермяков. -М.: Стройиздат, 1986.-559 с., ил.
7. Истомин В.А. Газовые гидраты в природных условиях/В.А. Истомин, В.С. Якушев. - М.:Недра, 1992. - 236 с.
8. Кочнева К.В. 10 000 миллиардов тонн под водой//Нефтегаз. - 2009. - №8.
9. Соловьев В.А. Газогидратоносность недр Мирового Океана//Газовая Промышленность. - 2001. - № 12.
- 10.Смирнов Л.Ф. Технологическое использование газовых гидратов. Природные и техногенные газовые гидраты: Сб. научных трудов/ Л.Ф. Смирнов -М.:ВНИИГАЗ, 1990. с.127-166.

Климов Геннадий Матвеевич  
Климов Александр Михайлович

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии  
для получения теплоты в системах теплоснабжения  
(газогидраты естественного газа)

Учебно-методическое пособие  
для студентов очной и заочной форм обучения направлений  
08.03.01 «Строительство» и 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Компьютерный набор:  
А.М.Климов – магистрант гр.МС-5/07,  
Д.А.Логунов, А.С.Щитаев

Подписано в печать \_\_\_\_\_ Формат 60x90 1/8 Бумага газетная. Печать трафаретная.  
Уч. изд. л. 3,2. Усл. печ. л 3,5. Тираж 300 экз. Заказ №

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» 603950, Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65.  
Полиграфический центр ННГАСУ, 603950, Н.Новгород, Ильинская, 65