



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-232-245  
УДК 550.8.056

Научная статья / Research article

## Сравнение инновационных технологий добычи газовых гидратов в Китае и Японии

Х. Сунь , Ц. Хуан , К.А. Воробьев 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация  
✉ 1042195045@rudn.ru

### История статьи

Поступила в редакцию: 23 марта 2022 г.  
Доработана: 8 августа 2022 г.  
Принята к публикации: 20 августа 2022 г.

### Ключевые слова:

гидраты природного газа, зона стабильности, газогидраты, методы разработки, технологии добычи, окружающая среда

**Аннотация.** В XX в. огромное внимание в мире уделялось изучению, разведке, освоению месторождений природного газа, представляющих собой обычные (традиционные) газосодержащие скопления углеводородов. Ограниченность и невозможность ресурсов свободного природного газа, растущий спрос на этот энергоноситель неизбежно заставили в XXI в. обратить внимание на значительные потенциальные ресурсы природного газа, заключенные в нетрадиционных источниках. К ним относятся метан угленосных толщ, сланцевый газ, водорастворенные газы подземной и надземной гидросферы, природные газовые гидраты. В исследовании рассматриваются современные технологии разработки природных газовых гидратов, в частности опытно-промышленная разработка месторождения Нанкай на шельфе Японии и ряд крупных месторождений на шельфе Китая. Описаны результаты научных изысканий, а также практический опыт применения различных способов воздействия на месторождения нетрадиционных углеводородов. Приведен ряд ключевых технических решений по разработке месторождений газовых гидратов, таких как контроль песка при добыче, искусственный подъем, геологический мониторинг и мониторинг окружающей среды. Информационная и нормативная база исследования отражает современный уровень развития науки и техники в разработке месторождений полезных ископаемых. Отражен мировой и отечественный опыт разработки технологий воздействия на месторождения нетрадиционных углеводородов с целью оптимизации и интенсификации процесса добычи.

### Для цитирования

Сунь Х., Хуан Ц., Воробьев К.А. Сравнение инновационных технологий добычи газовых гидратов в Китае и Японии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 232–245. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-232-245>



## Comparison of innovative gas hydrate extraction technologies in China and Japan

Haoyuan Sun , Qihong Huang , Kirill A. Vorobyev 

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

✉ 1042195045@rudn.ru

### Article history

Received: March 23, 2022

Revised: August 8, 2022

Accepted: August 20, 2022

### Keywords:

hydrates of natural gas, stability zone, gas hydrates, methods for developing, production technologies, environment

**Abstract.** In the 20th century, great attention in the world was paid to the study, exploration, development of natural gas deposits, which are ordinary (traditional) gas-containing accumulations of hydrocarbons. The limited and irreplaceable resources of free natural gas, the growing demand for this energy carrier inevitably forced in the 21st century to pay attention to the significant potential resources of natural gas contained in unconventional sources. These include coal-bearing methane, shale gas, water-dissolved gases of the underground and aboveground hydrosphere, natural gas hydrates. The authors discuss modern technologies for the development of natural gas hydrates, in particular the pilot development of the Nankai field on the shelf of Japan and a number of large deposits on the shelf of China. The results of scientific research are presented, as well as practical experience in the application of various methods of influencing deposits of unconventional hydrocarbons. The study introduces a number of key technical solutions for the development of gas hydrate deposits, such as sand control during extraction, artificial lifting, geological monitoring and environmental monitoring. The information and regulatory framework of the study reflects the current level of development of science and technology in the development of mineral deposits. The world and domestic experience in the development of technologies for the impact on unconventional hydrocarbon deposits in order to optimize and intensify the production process is reflected.

### For citation

Sun H, Huang Q, Vorobyev KA. Comparison of innovative gas hydrate extraction technologies in China and Japan. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):232–245. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-232-245>

### Введение

Природные газовые гидраты (водные клатраты) – кристаллические соединения, образующиеся при определенных термобарических условиях из воды и газа. Имя клатраты, от латинского *clathratus*, что значит «сажать в клетку», было дано Пауэллом в 1948 г.

Газовые гидраты стабильны при определенных термобарических условиях, характерных как для осадочных толщ в районах вечной мерзлоты, так и для осадков, залегающих под дном водоемов с глубиной более 400–500 м. Как правило, газогидраты обнаруживаются в осадках внешних континентальных окраин, а также в осадочных бассейнах, в которых действуют напряжения сжатия, в частности, из-за изменения протирания сдвиговых разломов.

Физико-химическая специфика природных газогидратов такова, что они способны аккумуля-

лировать большое количество газа в незначительных объемах и, следовательно, имеют значительный ресурсный потенциал. Однако все оценки ресурсов гидратов природных газов определены приблизительно. Они варьируют от максимальных, явно завышенных, сделанных без учета очевидных геолого-геохимических ограничений до минимальных, проведенных с учетом большого количества факторов, ограничивающих гидратообразование.

Компоненты газа, которые образуют гидраты, включают углеводородные газы, такие как метан, этан, пропан, бутан и их гомологи, а также несколько неуглеводородных газов. Эти молекулы газа существуют в структуре полости в форме клетки, состоящей из молекул воды. Поскольку углеводороды, образующие гидраты природного газа, представляют собой в основном метан (содержание > 99 %), их обычно называют гид-

ратами метана. Горючий лед содержит огромные ресурсы природного газа. 1 м<sup>3</sup> горючего льда эквивалентен 160~180 м<sup>3</sup> (стандарт) природного газа. На основе этой оценки глобальные залежи горючего льда составляют около  $1,8 \times 10^{16} \sim 2,1 \times 10^{16}$  м<sup>3</sup> ресурсов природного газа, общее количество которых эквивалентно удвоенному общему содержанию углерода в традиционных ископаемых видах топлива в мире.

Некоторые ученые считают, что количество углерода в природных гидратах метана примерно вдвое больше, чем в каменном угле, то есть гидраты метана могут быть основным источником углерода в земной коре.

Высокие предполагаемые значения позволяют рассматривать гидраты метана в поддонных осадках в качестве потенциального и экологически чистого источника энергии будущего.

Другим важным аргументом в пользу разработки и разработки газогидратных залежей (ГГЗ) являются незначительные глубины залегания (по сравнению с традиционным газом) и их широкое распространение в приповерхностных слоях литосферы.

При этом во многом неясны до сих пор условия и механизмы образования газогидратных залежей в природе, а также их поведение в геологическом масштабе времени. Серьезным ограничением для исследований является отсутствие прямых методов поиска газогидратных залежей и картирования гидратосодержащих отложений по коллекторским свойствам. Отсутствует единый подход к ранжированию газогидратных залежей по методам их разработки.

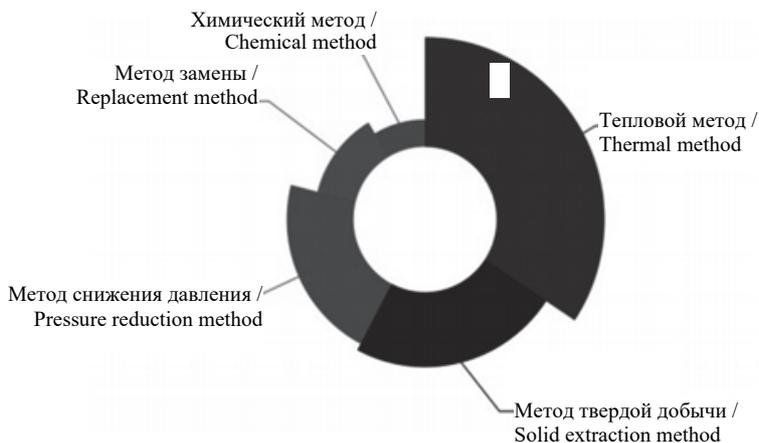
Одним из возможных подходов к решению перечисленных проблем является классифицирование газогидратных залежей по принципам, отражающим геологическую специфику того или иного вида газогидратных скоплений, а также его добычной потенциал. Кроме того, в классификации должна быть заложена информация, позволяющая выбрать тот или иной метод разработки ГГЗ в зависимости от ее вида.

Гидраты метана метастабильны вблизи подошвы зоны стабильности. При повышении уровня моря и росте гидростатического давления на его дне или при уменьшении температуры осадков происходит рост мощности слоя, в котором могут содержаться газогидраты, при условии, что ниже границы зоны стабильности присутствует в необходимых количествах растворенный в воде метан.

Проводятся интересные научные и экспериментальные исследования в области разработки газогидратных месторождений и образования газовых гидратов [1–3].

## 1. Методы добычи гидрата природного газа в Китае

В настоящее время существует множество методов добычи газогидрата, и типичные из них включают метод снижения давления, тепловой метод и химический метод (рис. 1). Из-за ограничений производственных условий исследования добычи газогидрата по-прежнему в основном сосредоточены на двух аспектах: эксперименте в помещении и численном моделировании [4].

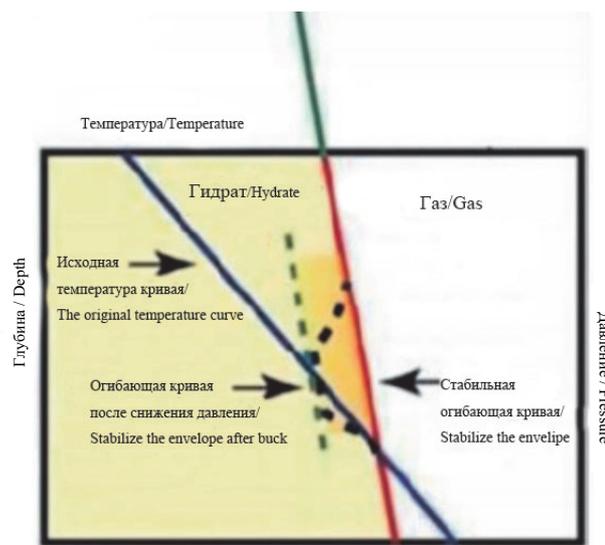
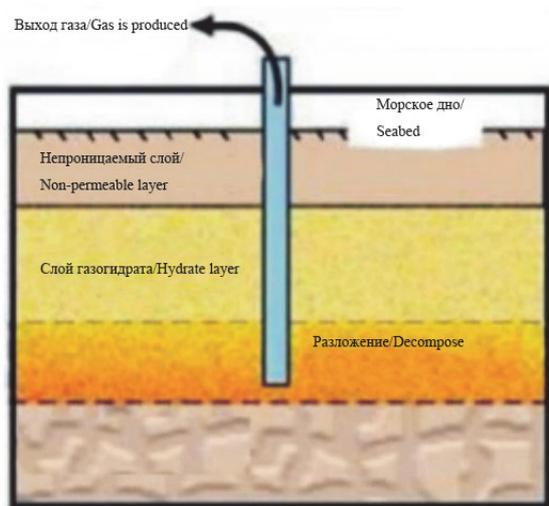


**Рис. 1.** Доля технологий добычи гидратов природного газа, используемых в Китае  
**Figure 1.** The share of natural gas hydrate extraction technologies used in China

### 1.1. Метод снижения давления

Метод снижения давления снижает давление гидратного коллектора за счет извлечения грунтовых вод или газлифта. Когда давление гидрата падает ниже равновесного давления, он самопроизвольно разлагается, тем самым реализуя использование гидрата. Метод снижения давления показан на рис. 2 [4]. Поскольку его работа относительно проста, он может способствовать относи-

тельно быстрому разложению большого количества гидрата природного газа, этот метод считается наиболее экономически ценным при добыче горючего льда. В то же время следует отметить, что во время процесса добычи с разгерметизацией понижается температура пласта, что может стать причиной образования льда или вторичного гидрата, заблокировать путь фильтрации и повлиять на эффективность добычи [4].



**Рис. 2.** Принципиальная схема депрессионного метода  
**Figure 2.** Schematic diagram of depression mining method

### 1.2. Тепловой метод

Тепловой метод заключается в повышении температуры резервуара гидрата каким-либо образом, чтобы сделать ее выше, чем температура равновесия гидрата для разложения гидрата. Добыча с нагнетанием тепла показана на рис. 3 [4], перечислены общие методы нагнетания тепла, а также их преимущества и недостатки. Тепло, потребляемое в процессе закачки тепла, в основном используется для повышения температуры породы-коллектора, повышения температуры жидкости между порами гидрата, разложения и абсорбции гидрата и внешней теплопередачи; в этом процессе, помимо поглощения тепла при разложении гидрата, существуют другие тепловые потери. Проблема отходов, а также из-за наличия горных пород в коллекторе и ограничения теплопроводности поровых флюидов, распространение тепла очень ограничено, и трудно достичь мест, удаленных от добывающей скважины. Различные причины приводят к низкой эффективности добычи с нагнетанием тепла.

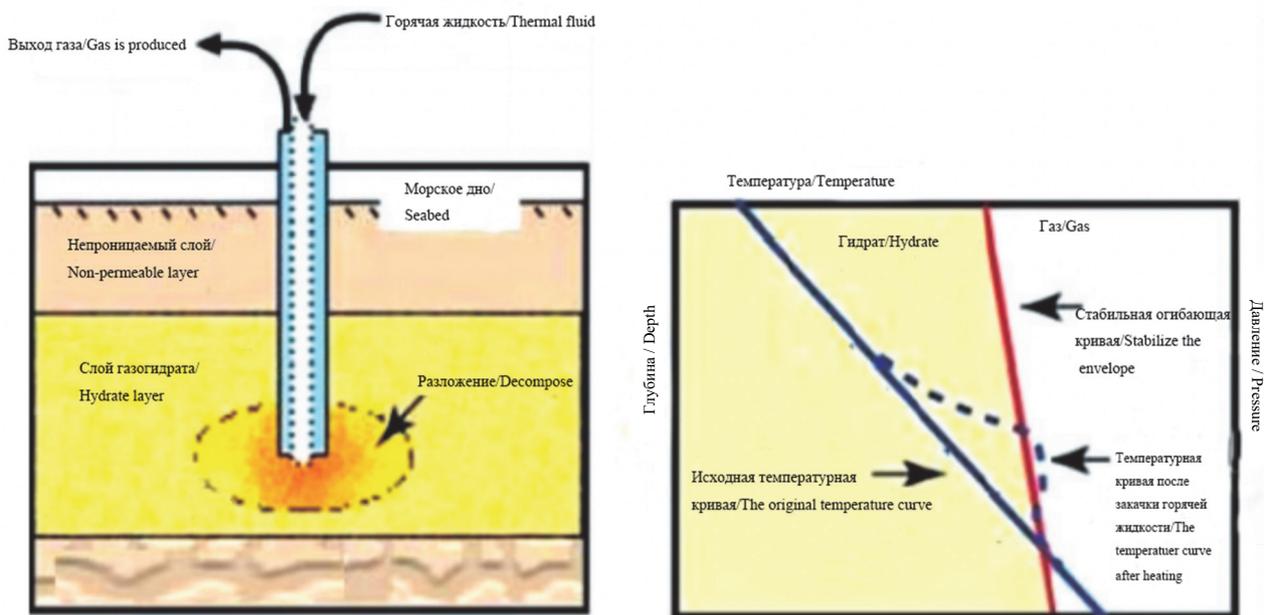
В известном в настоящее время процессе добычи на месте метод нагнетания тепла редко используется в одиночку и обычно сочетается с другими методами добычи в качестве средства для быстрого разложения резервуаров гидратов на ранней стадии.

### 1.3. Метод замены

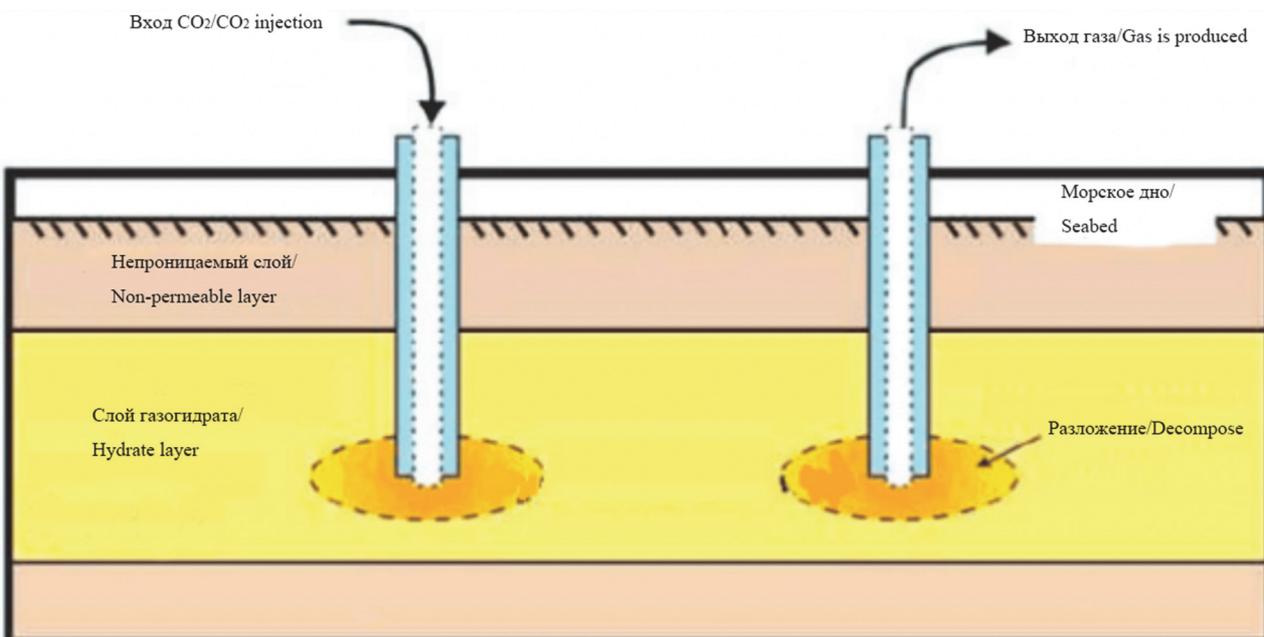
В методе замены вместо метана используется  $\text{CO}_2$  или жидкость. Принцип добычи показан на рис. 4 [4]. Тепло, выделяющееся во время вытеснения, может способствовать разложению гидратов и заставлять рассеянный газ заполнять поры пласта. Процесс замены не предполагает фазового перехода, поэтому он более безопасен. В то же время парниковые газы могут храниться на морском дне, чтобы уменьшить парниковый эффект на суше. Поэтому этот метод вызвал большой интерес у исследователей-специалистов. Однако после исследований было обнаружено, что эффективность замены этого метода невысока, а требуемые условия для замены относи-

тельно жесткие. В то же время CO<sub>2</sub> легко проникает в горную скважину, что создает новые проблемы разделения. В настоящее время существ-

вует несколько коммерческих применений метода замены, но он всегда был горячей темой для исследований [5].



**Рис. 3.** Принципиальная схема теплового метода  
**Figure 3.** Schematic diagram of thermal injection mining method



**Рис. 4.** Принципиальная схема метода замены  
**Figure 4.** Schematic diagram of displacement mining method

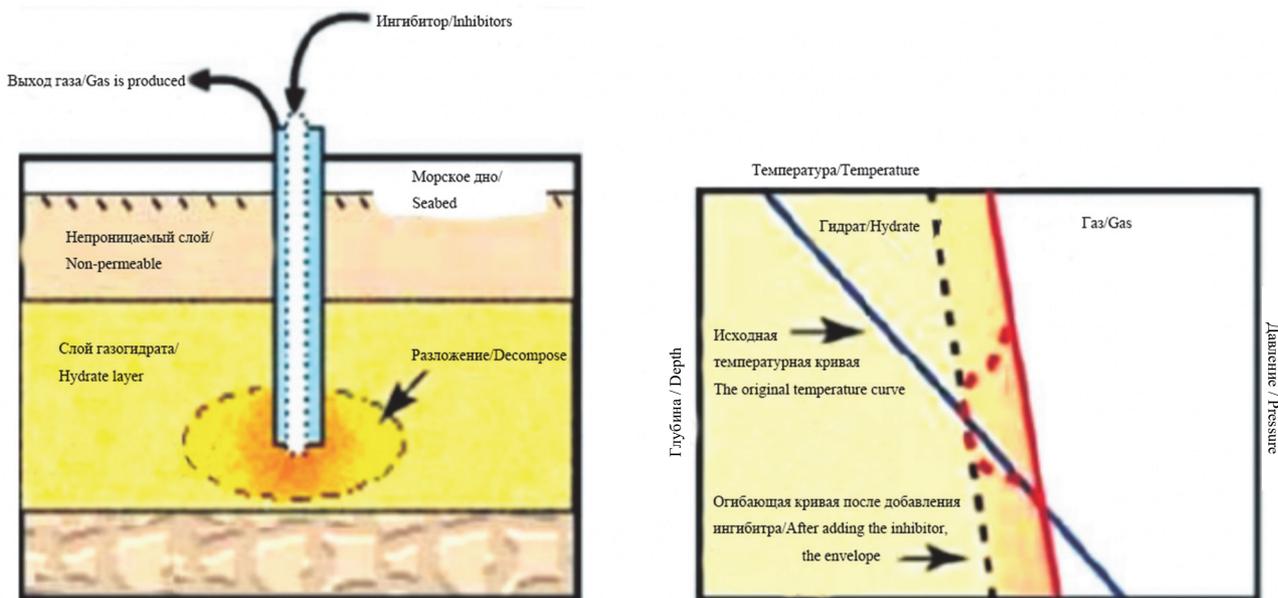
#### 1.4. Химический метод

Химический метод вводит химический ингибитор в отложения гидрата, чтобы разорвать водородные связи между молекулами гидрата и

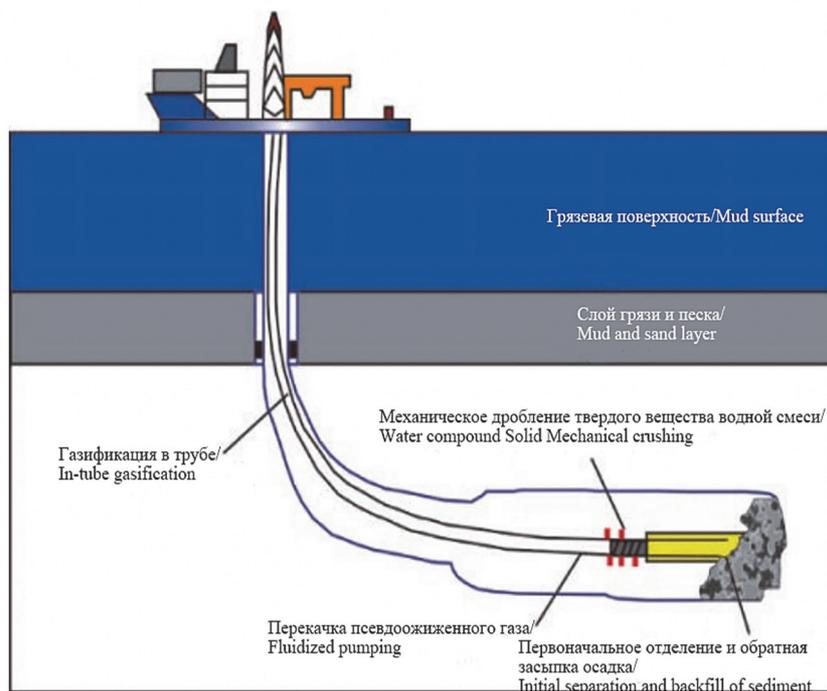
изменить условия фазового равновесия для существования гидратов, чтобы способствовать разложению гидратов. Принцип добычи показан на рис. 5 [4]. Было подтверждено, что этот метод

может увеличить добычу природного газа, и может реализовать разложение гидратов с закачкой очень низкой энергии на начальной стадии эксплуатации. Однако ингибиторы очень дороги.

В то же время ингибиторы будут оказывать неблагоприятное воздействие на грунтовые воды и морскую экологическую среду, поэтому использование этого метода ограничено [5].



**Рис. 5.** Принципиальная схема химического метода  
**Figure 5.** Schematic diagram of inhibitor injection method



**Рис. 6.** Принципиальная схема метода добычи в твердом псевдооживленном слое  
**Figure 6.** Schematic diagram of solid fluidization mining method

### 1.5. Метод добычи в твердом псевдооживленном слое

Твердотельная добыча в псевдооживленном слое – это новый метод добычи гидратов, предложенный в последние годы, который обеспечивает высокую эффективность добычи недиагенетического горючего льда. Принцип добычи этого метода: используйте горное оборудование для непосредственной выемки твердого горючего льда, затем измельчите осадок гидрата на мелкие частицы, а затем транспортируйте его с морской водой на морскую платформу через закрытый стояк и сравните полученный твердый гидрат или суспензию на морской платформе. Принцип добычи показан на рис. 6. [6]. Этот метод реализует твердотельную разработку на месте, снижает риск инженерно-геологических катастроф, вызванных разложением горючего льда, а также в определенной степени позволяет избежать парникового эффекта.

Гидраты природного газа в Южно-Китайском море имеют небольшую глубину залегания, слабую цементацию и легко поддаются фрагментации, что очень подходит для использования метода твердого псевдооживления. Поэтому предложение этого метода вызвало исследовательский интерес многих отечественных ученых. В апреле 2015 г. Юго-Западный нефтяной университет основал первую в мире «Морскую лабораторию недиагенетической добычи газовых гидратов с псевдооживленным слоем, которая может выполнять подготовку твердых гидратов большого объема, оценивать разрушающую способность горного оборудования и проводить псевдооживление гидратов. Оценка емкости горных пород, моделирование процесса транспортировки гидратов по трубопроводам, разложение гидратов и реологические исследования [6]. По имеющимся данным, в мае 2017 г. Китай впервые применил технологию твердотельного псевдооживления в северной части Южно-Китайского моря для достижения пробной добычи с чистотой газа  $81 \text{ м}^3$ . Эта промысловая пробная добыча доказала возможность использования метода твердофазного псевдооживления при эксплуатации неглубоких недиагенетических газовых гидратов.

## 2. Добыча газовых гидратов в Японии

В настоящее время Япония является третьей по величине экономикой в мире, потребляя тем самым огромное количество энергии. Ее земельная площадь невелика, при этом в Японии заметна

серьезная нехватка нефтегазовых ресурсов, которые сильно зависят от импорта. Структура энергетической безопасности в Японии очень слаба. Поэтому Япония положительно относится к освоению новых источников энергии. Страна уже давно начала исследования газовых гидратов, вкладывая в изучение много денег и технического персонала каждый год [7]. Многолетние геологоразведочные исследования доказали, что в Японском море имеется большое количество газовых гидратов, но их добыча представляет собой дорогостоящий и тяжелый процесс. Для того чтобы как можно скорее добиться разработки и добычи морских газовых гидратов, решить внутренние энергетические проблемы, Япония разработала долгосрочный план развития газовых гидратов [8–10].

В 2013 г. Япония осуществила первую в мире пробную добычу морского газового гидрата, пробная глубина добычи составила 1006 м [11], пробная добыча продолжалась 6 дней, общий объем природного газа составил  $12 \times 10^4 \text{ м}^3$ , среднесуточная добыча газа составила  $2 \times 10^4 \text{ м}^3$ , совокупная добыча  $1245 \text{ м}^3$  [12].

В 2017 г. Япония провела вторую пробную добычу газовых гидратов после полного резюме первой пробной добычи. Первые испытательные горные скважины были запущены в период с 4 по 15 мая, испытательная добыча в общей сложности составила 12 дней. Кумулятивная добыча газа составила  $3,5 \times 10^4 \text{ м}^3$ , но из-за образования песчаных проблем испытательная добыча была приостановлена. Второй устьевой тест горных скважин был проведен с 5 по 28 июня, тестовая добыча в общей сложности 24 дня кумулятивная добыча газа составила около  $20 \times 10^4 \text{ м}^3$ .

### 2.1. Японский метод пробной добычи газовых гидратов

В настоящее время успешная тестовая добыча газового гидрата была осуществлена по средствам следующих методов добычи:

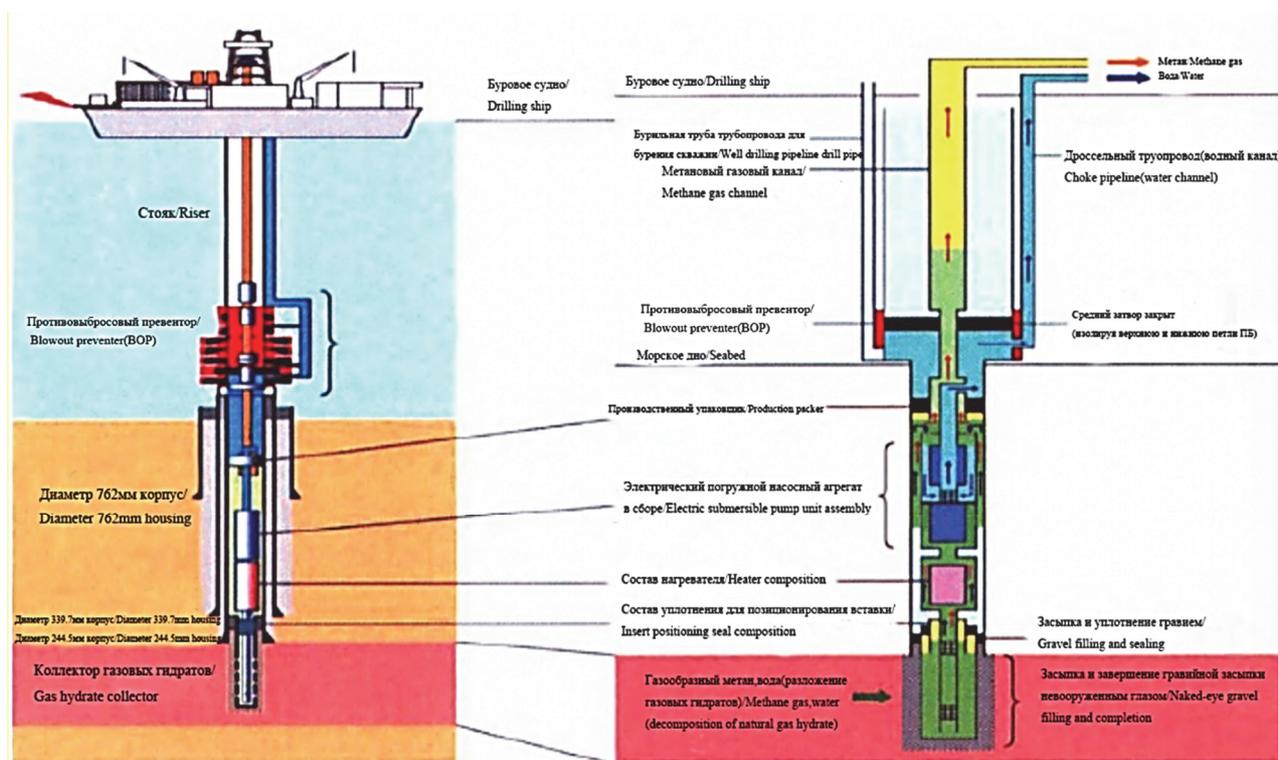
- метод бака;
- термальный метод впрыски;
- химический метод впрыски;
- метод замены углекислого газа;
- подводный твердый метод минирования псевдооживления;
- несколько методов интегрированного использования.

Популярный и широко используемый из всех применяемых методов, является метод бака. По-

нижающий метод, заключающийся в снижении пластового давления газовых гидратов для разрушения стабильных условий наличия гидратного давления, способствующих продолжительному разложению гидратов, считается наиболее эффективным, наиболее экономичным и простым методом пробной добычи газовых гидратов. Однако добыча экономически целесообразна только в том случае, если гидратный резервуар расположен вблизи границы равновесия температуры и давления [13].

В 2013 г. в добыче газовых гидратов использовался метод снижения давления и метод нагнетания тепла, испытывая горную колонну,

как показано на рис. 7 [14] насосном агрегате, который используется для снижения пластового давления и, как следствие, для достижения разложения газового гидрата. Установка нагревательного узла в положении резервуара колонны используется для нагрева газового гидрата, улучшения температуры гидратного резервуара. В результате нагревания происходит повреждение гидратных водородных связей, и далее происходит разложение газового гидрата. После того, как колонна вошла в эксплуатацию, нагреватель повредился и не играл нагревательной роли, тем самым был достигнут ступенчатый метод пробной добычи газового гидрата.



**Рис. 7.** Испытательная структура ствола скважины для добычи гидратов в Японском море в 2013 г.  
**Figure 7.** Hydrate production test wellbore structure in Japan Sea in 2013

В 2017 г. Япония осуществила вторую и третью пробную добычу морских газовых гидратов, используя только метод снижения давления, исключив совместное использование метода нагнетания тепла. После нескольких наземных испытаний и демонстраций было установлено, что энергоэффективность инъекционного теплового метода низка, увеличение нагревательного устройства приведет к увеличению сложности струны. По сравнению с первой опыт-

ной добычей полезных ископаемых, для обеспечения стабильности контроля давления и ствола скважины применяется метод пошагового понижения. Газовый гидрат Японского моря в три раза превосходит процесс пробной добычи, и результаты показывают, что текущий уровень технологии при использовании понижающего метода для пробной добычи является простым, наиболее эффективным и наиболее экономичным методом пробной добычи газового гидрата.

## 2.2. Технология контроля гидратного песка

Резервуары с газогидратами находятся в основном в слабо сцементированных породах. Поскольку диагенетическая структура не достигнута, прочность породы низкая. Когда газовый гидрат стабилен, рыхлый пластовый газовый гидрат помогает закрепить пласт. После разложения газового гидрата прочность пласта будет значительно снижена, что приведет к ухудшению гелеобразования, значительному снижению механической прочности пласта, образованию большого количества песка, что в дальнейшем приведет к нестабильности ствола скважины. Поэтому для долговременной добычи газового гидрата необходимо решить проблему песка.

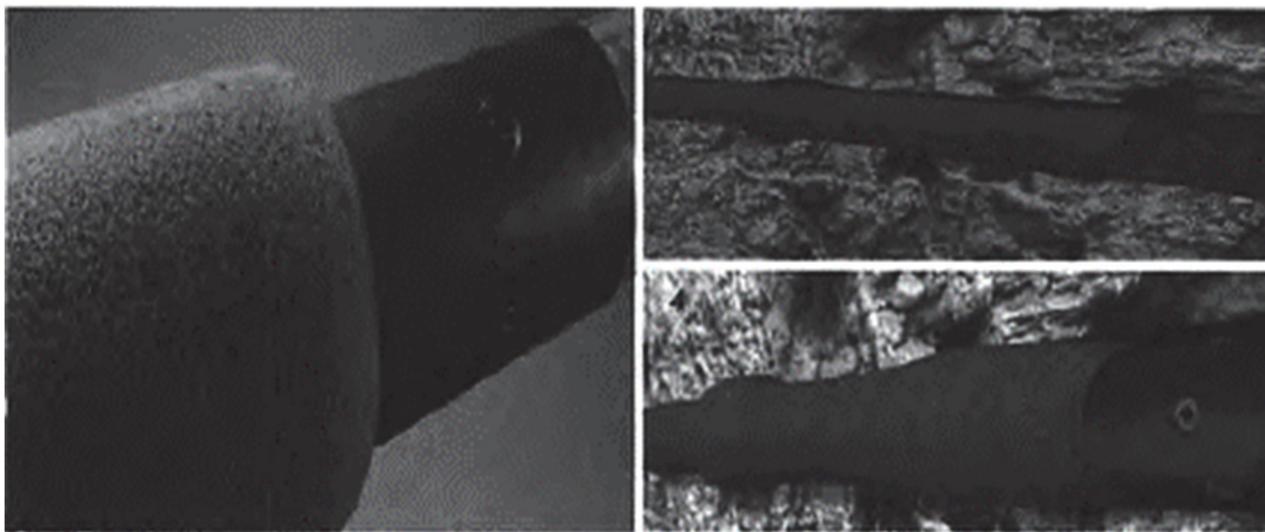
В 2013 г. Япония провела ранний контроль песка, когда осуществила свою первую пробную добычу морских газовых гидратов. Для того чтобы получить большую степень выхода пласта, используется процесс контроля гравийной засыпки песком, осуществляемый по приблизительным расчетам.

Общая масса засыпанного гравия составила около 2136 кг, а давление наполнения – до 8,1 МПа. Пробная добыча была завершена 12 марта 2013 г. На шестой день испытательной добычи был обнаружен слой песка, а датчики контроля давления стали фиксировать резкое увеличение. Также при испытательной добыче добыча воды быстро возросла. Из-за плохих погодных условий на море испытательный корабль «Земля» не имел большого количества выходящего песка, мощности по

переработке жидкой смеси. Донное давление повышалось, добыча газа прекращалась. Чтобы обеспечить безопасность испытательного горного судна и персонала, государство было вынуждено остановить испытательную горную операцию.

Анализ показывает, что образование песка происходит из-за разложения пластового газового гидрата, так как движение гравия, вызванное обнажением песчаного экрана, и образование потока воздуха, приводимого в движение ударом экрана, вызванное разрушением экрана, а затем образование песка и засыпка песка в ствол скважины, приводят к выходу из строя насоса, вынуждая тем самым прекратить весь пробный процесс добычи. За весь пробный процесс бычи образование песка составило 30 м<sup>3</sup> [15]. Таким образом, пробный процесс добычи показал, что засыпка гравия способствует увеличению добычи, но его стеновая несущая способность слаба [16].

В 2017 г. Япония осуществила свою вторую морскую пробную добычу полезных ископаемых, отказавшись от схемы засыпки гравия, и приняла систему контроля песка Geoform, разработанную компанией Baker Hughes. Однако, принимая во внимание риск того, что система контроля геоформного песка может не расширяться, Япония использовала предварительно расширенную систему контроля геоформного песка в скважине и систему контроля геоформного песка в скважине расширения двух операционных программ во второй пробной добыче, как показано на рис. 8 [17].



**Рис. 8.** Экран расширения GeoFORM перед входом в скважину и расширения после входа в скважину  
**Figure 8.** Geoform expandable screen pipe before and after running in the well

Первая испытательная скважина использует грунтовую предварительно расширенную геοформную систему, а затем спускается в скважину. За 12 дней общая добыча газа составила около  $3,5 \times 10^4$  м<sup>3</sup>. После выброса песка, первую скважину вынуждены были отключить. Вторая скважина была использована до самого дна расширения геοформной системы контроля песка. Добыча длилась 24 дня, общая добыча газа составила около  $20 \times 10^4$  м<sup>3</sup>. До конца добычи вторая скважина не песковала.

Таким образом, предварительно расширенная геοформная система контроля песка позволяет избежать риска не расширяться в скважину, но есть недостаток опоры стенки, и тогда есть риск нерасширения активного вещества. Такая операция более сложная, но опора стенки и контроль песка оказывают значительный эффект.

Как видно из применения японской технологии контроля песка процесса пробной добычи газового гидрата, долгосрочное производство цементации резервуара разложения газового гидрата уменьшилось, заполнение потока песка приведет к открытому экрану, в то время как стабильность стены снизится. Перед входом в скважину расширение геοформного экрана также не блокирует образование вторжения песка, а после подземного расширения геοформного экрана эффект контроля песка хороший, что указывает на то, что поддержание эффективной блокировки песка и стабильности стенок является ключом к успеху контроля гидратного песка.

### **2.3. Технология искусственного лифтинга газовых гидратов**

Искусственное поднятие является основой для реализации добычи. В пробной добыче газовых гидратов в Японском море использовались:

- погружные электроцентробежные насосы (УЭЦН);
- система снижения гидростатического давления столба в скважине;
- колонная структура: электромагнитный котел + электрический погружной центробежный насос + упаковщик + трубопровод.

С помощью электрического погружного насоса для извлечения пластовой жидкости вручную снижают донное давление, чтобы способствовать стабильному присутствию газового гидрата; нарушаются условия давления, чтобы добиться непрерывного разложения, а затем подземного

газожидкостного разделения. Газ выгружается вдоль центральной колонны, вода, образующаяся после разложения через дросселирующий коллектор (убойный коллектор), поднимается на поверхность платформы в наземный испытательный процесс.

Для достижения понижающего метода испытаний горных работ искусственный подъемный электрический погружной насос включает в себя две ключевые технологии:

- скважинную газожидкостную технологию;
- технологию частотного регулирования.

Скважинный газовый сепаратор обычно используется в качестве всасывающего порта электрического погружного насоса, закрепленного на нижнем конце насоса, разложения газового гидрата после гравитационного разделения вторичного разделения. Технология частотного регулирования через инвертор используется для достижения изменения напора насоса, а также для смещения и расширения объема насоса, для достижения автоматической скорости частотного регулирования. Также технология частотного регулирования используется для того, чтобы поднять газовый замок, автоматический двигатель защиты от пониженной частоты, столкнувшийся с большой нагрузкой, так что электрический погружной насос может адаптироваться к воде и песку, продлить срок службы насоса, увеличить скорость.

В 2013 г. в Японии впервые была проведена пробная добыча полезных ископаемых. Поскольку существует ряд скважин с уменьшенным диаметром ствола, что приводит к более быстрому расходу газа и жидкости, не удалось добиться эффективной гравитационной сепарации, а контроль забойного давления показывал плохие показания. Технология частотного регулирования, использование диаметра в совокупности с системой разделения кожуха, электрического погружного насоса в то же время может повышать эффективность разделения газа и воды.

### **2.4. Технология геологического и экологического мониторинга**

Утечка при разработке гидратов может привести к подводным оползням, обострению глобального парникового эффекта, ухудшению морской экологической обстановки и другим крупным экологическим катастрофам [18–21]. Поэтому в процессе разработки газовых гидратов страны проявляют осторожность.

Япония провела мониторинг на месте во время своих первых морских и гидратных испытаний [22]. В то же время основное внимание уделялось мониторингу деформации морского дна, устойчивости резервуаров, утечке метана, устойчивости гидратных резервуаров.

В 2013 г. три контрольные скважины были пробурены рядом со скважиной АТ1-Р, первой в Японии испытательной добывающей скважиной газового гидрата. Распределенные волоконно-оптические датчики температуры и резистивные матрицы датчиков температуры расположены в контрольных скважинах АТ1-МТ1 и АТ1-МС для осуществления контроля донной температуры и радиуса разложения гидратов. По техническим причинам этот мониторинг не контролировал донное давление.

Результаты экологического мониторинга и экологического исследования морского дна первой пробной добычи гидратного морского песка показывают, что масштабы первой пробной добычи имеют меньший риск воздействия на окружающую морскую среду.

Благодаря анализу, оценке и обобщению первого пробного горного мониторинга, в 2017 г. была осуществлена гидратная пробная горная схема, состоящая из одной разведочной скважины, двух контрольных скважин, двух эксплуатационных скважин, из которых первая контрольная скважина пробурена через слой обогащения газовых гидратов, вторая контрольная скважина пробурена до слоя обогащения для остановки бурения.

Вторая пробная добыча осуществлена для достижения всего процесса мониторинга изменения концентрации морского метана и изменения морского дна, мониторинга скважин в дополнение к организации мониторинга температуры, но и повышенного контроля давления, а также для достижения за год до пробной добычи и пробной добычи после полугодового мониторинга [23].

В 2018 г. были сформированы данные температуры и давления, измеренных на двух наблюдательных скважин. Были получены результаты влияния тест гидратов на окружающую среду морского дна.

### **3. Последствия исследований и разработок газового гидрата в Японии для Китая**

Основываясь на данные исследования разработки гидрата метана в Японии, выдвигаются сле-

дующие предложения относительно будущих исследований и разработок газового гидрата в Китае:

1) четкие цели: газовый гидрат из-за его огромного ресурсного потенциала, рассматриваемого в качестве важного источника энергии в будущем, может быть использован для бурения газового гидрата, а экономические исследования и разработки технологий добычи помогут обеспечить долгосрочную стабильность энергоснабжения Китая;

2) уточняющие цели: например, определение типа и характеристик залегания гидрата метана на шельфе Китая, оценка количества метана, образующегося в ресурсах гидрата метана, скрининг перспективных районов ресурсов газового гидрата и благоприятных зон разработки, разработка исследовательских испытаний в выбранном районе, дальнейшее совершенствование технологии промышленной добычи и создание системы разработки системы в соответствии с конкретными условиями участка, каждый шаг должен иметь четкие и достижимые численные цели и маршруты;

3) разработка дорожной карты: целенаправленное определение приоритетов требуемой работы, шагов по ее осуществлению и ожидаемых результатов;

4) создание имитатора добычи газового гидрата с независимыми правами интеллектуальной собственности, на основе углубленных и детальных разведочных работ и доступа к большому количеству характеристик гидратного пласта, для района обогащения газового гидрата для проведения моделирования добычи и прогнозирования научно-исследовательских работ, с тем чтобы в сочетании с другими методами всесторонней оценки и выбора участков можно было бы отдать приоритет испытаниям добычи;

5) разработка газового гидрата в Китае должна мобилизовать энтузиазм предприятий.

В настоящее время иностранные пилотные проекты по добыче гидрата были осуществлены с участием предприятий и ведущих компаний, таких как ConocoPhillips и Chevron, японское Национальное агентство нефти и газа металлов и минеральных ресурсов, ВР и Южнокорейская национальная нефтяная компания, а также правительственные ведомства, которые должны принимать участие в плане финансирования, политики и управления проектами.

## Заключение

Все возрастающий интерес к проблеме газовых гидратов связан с признанием того факта, что в долгосрочной перспективе природные газовые гидраты могут стать новым источником природного газа благодаря весьма значительным ресурсам, неглубокому залеганию и концентрированному состоянию в них газа. Кроме того, накапливаются данные, свидетельствующие о важной роли процессов образования и разложения газовых гидратов в глобальных природных процессах.

В течение ряда лет уже действуют национальные газогидратные программы в США, Японии и Индии. Активизируются исследования в Китае и Южной Корее.

В последние годы по газогидратной проблематике ежегодно проводится 3–4 региональных и международных конференции (последние прошли в Японии, США, Канаде, Германии, Франции), организован ряд постоянно действующих школ (например, начиная с 1996 г. 2–3 раза в год работает Международная школа-семинар *Controlling Hydrates, Waxes and Asphaltenes*). Доклады по различным аспектам газовых гидратов представляются на международные конференции по супрамолекулярной химии, соединениям включения, термодинамике, теплофизике, геокриологии, а также на нефтяных, газовых и геологических симпозиумах и конгрессах.

Анализ литературных источников показывает, что ежегодно по газогидратной тематике в мире публикуется не менее 500–600 работ (что в 2–2,5 раза превышает «фоновое» значение 10–15-летней давности). С «подключением» к данной тематике все более новых специалистов самого разного профиля резко обострилась проблема информационного обеспечения. В настоящее время европейским сообществом при активном привлечении российских специалистов решаются вопросы создания информационных баз, включающих данные по аспектам газогидратной проблемы.

Исследования газовых гидратов можно разделить на три взаимосвязанных направления:

1) фундаментальные исследования (строевые, физико-химические свойства, термодинамика и кинетика образования и разложения газовых гидратов);

2) технологические исследования газовых гидратов (предупреждение гидратообразования

и ликвидация газогидратных отложений, газогидратные технологии);

3) изучение природных газовых гидратов (поиск, разведка, анализ возможностей освоения газогидратных залежей, моделирование природных процессов гидратонакопления в лабораторных условиях), влияние газовых гидратов на глобальные геологические и экологические процессы.

Анализ всех известных газогидратопроявлений показал, что имеется два типа скоплений гидратов: скопления, связанные с очагами разгрузки флюидов на дне морей, которые формируются вблизи дна и контролируются флюидопроводниками (грязевые вулканы, диапиры, разломы), и скопления, прямо не связанные с очагами разгрузки (находящиеся на значительной поддонной глубине), но также контролируемые потоками флюидов. Наличие скоплений второго типа подтверждается результатами глубоководного бурения, выявившего приуроченность таких скоплений к зонам опреснения и к относительно грубозернистым отложениям. Форма и размер скоплений, а также распределение гидратосодержащих пластов в их пределах, определяются потоками газовых флюидов (концентрированными и рассредоточенными) и параметрами диффузионного ореола рассеяния.

Для решения ряда существующих проблем поиска, картирования и разработки субаквальных газогидратных залежей, а также для перехода в исследовании морских газогидратов от уровня «геологии» к уровню «разработки», по мнению исследователей, необходимы следующие шаги:

1. Типизация газогидратных залежей по принципам, отражающим возможные варианты их картирования, ресурсных оценок и разработки. Для субаквальных газогидратных залежей выделены два основных генетических вида залежей: субаквально-биохимические и субаквально-катагенные – и показано, что именно с последним видом газогидратных скоплений в первую очередь связаны основные перспективы разработки субаквальных газогидратов;

2. Анализ возможных механизмов формирования химического состава гидратного газа в том или ином типе залежей. В различных условиях возможно образование как «чистых» метановых газогидратных залежей, так и формирование гидратных залежей со сложным составом газогидратообразователя;

3. Оценка возможности использования скоплений субаквальных газогидратов как индикаторов более глубоких залежей нефти и газа. При прогнозировании подгидратных скоплений углеводородов необходимо учитывать не только наличие каналов их миграции, но и существование в разрезе покрышек и ловушек для перехвата и аккумуляции глубинных углеводородов;

4. Анализ методов разработки субаквальных газогидратных залежей в зависимости от генезиса и химического состава газогидратообразователя, а также от удаленности газогидратных скоплений от береговой линии.

Свойства природного газа в определенных условиях образовывать твердые соединения активно используются в сфере новых технологий.

Предлагается также использовать газовые гидраты как химическое сырье для опреснения морской воды и разделения газовых смесей.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

– газовые гидраты являются единственным не разрабатываемым источником природного газа на Земле, который может составить реальную конкуренцию традиционным месторождениям. Значительные потенциальные ресурсы газа в гидратных залежах надолго обеспечат человечество высококачественным энергетическим сырьем;

– освоение газогидратных месторождений требует разработки новых, гораздо более эффективных, по сравнению с существующими, технологий разведки, добычи, транспортировки и хранения газа, которые смогут применяться и на традиционных газовых месторождениях, в том числе на тех, отработка которых сейчас не рентабельна;

– добыча газа из гидратных залежей способна очень быстро изменить ситуацию на газовом рынке, что может повлиять на экспортные возможности Китая и Японии.

#### Список литературы / References

1. Воробьев А.Е., Малюков В.П., Рыгзынов Ч.Ц. Экспериментальное исследование образования газовых гидратов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2012. № 2. С. 85–93.

Vorobev AE, Maluykov VP, Rygzynov ChT. Experimental study of formation of gas hydrates. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2012;(2):85–93. (In Russ.)

2. Воробьев А.Е., Болатова А.Б., Байлагасова И.Л. Методология проведения экспериментальных исследований аквальных газогидратов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2012. № 3. С. 24–35.

Vorobiev AE, Bolatova AB, Baigalasova IL. Methodology for experimental studies of aquatic gas hydrates. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2012;(3):24–35. (In Russ.)

3. Малюков В.П., Токарев И.С. Исследования разработки Нанкайского газогидратного месторождения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 127–136. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2018-19-1-127-136>

Malukov VP, Tokarev IS. Research on the development of the Nankai gas hydrates field. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018;19(1):127–136. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2018-19-1-127-136>

4. Li L, Miao Q. Summary of technological development of natural gas hydrate exploration and development. *General Exploration Institute of China General Administration of Coal Geology*. Beijing; 2014. p. 67–71. (In Chin.) <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-5539.2014.01.018>

5. Zhou S, Li Q, Lv X, Fu Q, Zhu J. Key issues in development of offshore natural gas hydrate. *Frontiers in Energy*. 2020;14:433–442. <https://doi.org/10.1007/s11708-020-0684-1>

6. Wei N, Pei J, Zhao J, Zhang L, Zhou Sh, Luo P, Li H, Wu J. A state-of-the-art review and prospect of gas hydrate reservoir drilling techniques. *Frontiers in Earth Science*. 2022;2:997337. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.997337>

7. Wang C, Du D, Zhu Z, Liu Y, Yan S, Yang G. Estimation of potential distribution of gas hydrate in the northern South China Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 2010;28:693–699. <https://doi.org/10.1007/s00343-010-0097-9>

8. Ning F, Liu L, Li Sh, Zhang K, Jiang G, Wu N, Sun Ch, Chen G. Well logging assessment of natural gas hydrate reservoirs and relevant influential factors. *Acta Petrolei Sinica*. 2013;34(3):591–606. (In Chin.) <https://doi.org/10.7623/syxb201303026>

9. Fu Q, Zhou S, Li Q. Natural gas hydrate exploration and production technology research status and development strategy. *Engineering Sciences*. 2015;17(9):123–132. (In Chin.)

10. Zuo R, Li Y. The research and successful production test for NGH in Alaska North Slope, USA. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*. 2017;44(10):1–17. (In Chin.)

11. Yamamoto K. Methane hydrate offshore production test in the Eastern Nankai Trough: a milestone on the path to real energy resource. *Proceedings of 8th International Conference on Gas Hydrates*. Beijing: ICGH8 Organization; 2014.

12. Yamamoto K, Terao Y, Fujii T, Ikawa T, Seki M, Matsuzawa M, Kanno T. Operational overview of the first offshore production test of methane hydrate in the Eastern

*Nankai Trough*. Paper OTC-25243-MS (presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2014).

13. Du W. Production test technology of natural gas hydrate. *Well Testing*. 2019;28(1):20–24. (In Chin.)

14. Li Y, Liu L, Liu C, Sun J, Yu G, Chen Q. Sanding prediction and sandcontrol technology in hydrate exploitation: a review and discussion. *Marine Geology Frontiers*. 2016;32(07):36–43. (In Chin.) <https://doi.org/10.16028/j.1009-2722.2016.07005>

15. Yamamoto K, Terao Y, Fujii T, Ikawa T, Seki M, Matsuzawa M, Kanno T. Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough. *Offshore Technology Conference*. 2014. <https://doi.org/10.4043/25243-MS>

16. Rutqvist J, Moridis GJ, Grover T, Silpngarmert S, Collett TS, Holdich SA. Couple multiphase fluid flow and wellbore stability analysis associated with gas production from ocean hydrate-bearing sediments. *Journal of Petroleum Science & Engineering*. 2012;92–93(4):65–81. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.004>

17. Du W. Talking about sand control technology of muddy siltstone. *Petrochemical Industry Technology*. 2018;25(2):141. (In Chin.) <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.004>

18. Zhu C, Jia Y, Liu X, Zhang H, Zheng HM, Shan H. Classification and genetic mechanism of submarine landslide. *Geology & Quaternary Geology*. 2015;35(6):153–163.

(In Chin.) <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2015.06.016>

19. Wu X, Zhang B, Zhang W, Wang Y, Sun Z, Shao M. New developments in gas hydrate recovery technology. *Advances in New and Renewable Energy*. 2015;3(3):218–225. (In Chin.) <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560X.2015.03.010>

20. Zuo R, Li Y. Japan's sampling study and successful production test for NGH in Nankai through. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*. 2017;44(12):1–20. (In Chin.)

21. Pang XQ, Chen ZH, Jia CZ, Wang EZ, Shi HS, Wu ZY, Hu T, Liu KY, Zhao ZF, Pang B, Wang T. Evaluation and re-understanding of the global natural gas hydrate resources. *Petroleum Science*. 2021;18:323–338. <https://doi.org/10.1007/s12182-021-00568-9>

22. Zhu C, Zhang M, Liu X, Wang Z, Shen Z, Zhang B, Zhang X, Jia Y. Gas hydrates: production, geohazards and monitoring. *Journal of Catastrophology*. 2017;32(3):51–56. (In Chin.)

23. Fujin Suzuki K, Tamaki M. The election of the candidate location for the second offshore methane hydrate production test and geological findings from the predrilling operation, in the eastern Nankai Trough, Japan. The 9th International Conference on Gas Hydrate. Denver, Colorado USA, June 25–30, 2017.

#### Сведения об авторах

**Сунь Хаюань**, аспирант, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-1719-8976, eLIBRARY SPIN-код: 8809-5850; 1042195045@rudn.ru

**Хуан Цюхун**, магистр, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-1396-1815; 932998181@qq.com

**Воробьев Кирилл Александрович**, ассистент, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-5792-3979, eLIBRARY SPIN-код: 8425-7290; vorobyev\_ka@rudn.ru

#### About the authors

**Haoyuan Sun**, PhD student, Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1719-8976, eLIBRARY SPIN-code: 8809-5850; 1042195045@rudn.ru

**QiuHong Huang**, master, Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1396-1815; 932998181@qq.com

**Kirill A. Vorobyev**, assistant, Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5792-3979, eLIBRARY SPIN-code: 8425-7290; vorobyev\_ka@rudn.ru