

УДК 552.578.1

doi <https://doi.org/10.31996/mru.2018.4.26-31>

С. В. ГОШОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, професор, директор Українського державного геологорозвідувального інституту, ukrdgri@ukrdgri.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8312-6244>,

О. В. ЗУР'ЯН, канд. техн. наук, завідувач відділу інноваційних технологій Українського державного геологорозвідувального інституту, alexey_zuryan@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

S. V. GOSHOVSKYI, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Ukrainian State Geological Research Institute, ukrdgri@ukrdgri.gov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8312-6244>,

O. V. ZURIAN, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Innovative Technologies of the Ukrainian State Geological Research Institute, alexey_zuryan@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

СПОСОБИ І ТЕХНОЛОГІЇ ВИДОБУТКУ ГАЗУ МЕТАНУ З АКВАЛЬНИХ ГАЗОГІДРАТНИХ ФОРМУВАНЬ

СПОСОБЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ ГАЗА МЕТАНА ИЗ АКВАЛЬНЫХ ГАЗОГИДРАТНЫХ ФОРМИРОВАНИЙ

METHODS AND TECHNOLOGIES OF METHANE GAS EXTRACTION FROM AQUA GAS HYDRATE FORMATIONS

(Матеріал друкується
мовою оригіналу)

Наведено теоретичний аналіз особливостей розробки газу метану з аквальних покладів газових гідратів. Систематизовано способи і технології видобутку газу метану з газогідратних формувань, сипів і мулових вулканів. Представлено інноваційні методи освоєння покладів газових гідратів на базі застосування наночастинок і мікроорганізмів. Описано передбачувані екологічні ризики й можливі шляхи їхнього вирішення.

Ключові слова: метан, газогідрати, вуглекислий газ, наночастинки, бактерії.

In the bowels of the Earth and in the oceans of the World Ocean, there are practically unlimited resources of natural gas in the solid hydrate state, available to most countries of the world community.

The development of gas hydrate deposits is based on the process of dissociation (separation), in which the gas hydrates break down into gas and water. In these technologies, three methods for the development of gas hydrate deposits are proposed: pressure reduction, heating and inhibitor input. Based on the systematized data, the above methods are suggested to be attributed to traditional methods, as the most studied and classical ones.

It is proposed to identify a number of methods that imply the same results, but use other physical approaches and designate them as unconventional.

1. Decomposition of methane hydrates by nanoparticles.

In this method, the use of nanoparticles commensurate with the gas hydrate cell (supplied as part of a hydrodynamic jet) is proposed for efficient and safe destruction of the gas hydrate. The application of nanotechnology provides effective and consistent study of the entire surface of the aquatic deposit of gas hydrates, with the necessary rate of their destruction and the production of planned volumes of methane.

2. Decomposition of methane hydrates by microorganisms (bacteria).

In this process, in the process of the life of the bacteria, a gas must be released, replacing in the clathrate structure a molecule of methane per molecule of the given gas. In addition, the process must be controlled by the use of external factors that provide nutrition to the bacteria and at the same time, light, chemicals, electromagnetic radiation, etc. can be stopped at any time, which is absent in the natural conditions of formation of the gas hydrate.

Keywords: methane, gas hydrates, carbon dioxide, nanoparticles, bacteria.

Всякая наука черпает свои права на существование в возможности, так или иначе, оказаться полезной человечеству в качестве науки прикладной В. Освальд

В недрах Земли и акваториях Мирового океана существуют практически неограниченные ресурсы природного газа в твердом гидратном состоянии, доступные большинству стран мирового сообщества [15].

Для разработки таких месторождений необходима технически доступная, экономически обоснованная и максимально щадящая для окружающей природной среды технология добычи газа из месторождений газовых гидратов.

Необходимо отметить, что скопление нетрадиционных углеводородов, в том числе и таких, как газ метан из газогидратных залежей, содержится преимущественно в мало-

проницаемых породах и, как правило, имеет региональное распространение. Локализация нетрадиционных скоплений углеводородов не зависит от структурного фактора.

Характерной особенностью нетрадиционных скоплений углеводородов является отсутствие четкого разделения на коллектор и флюидоупор. Порода одновременно является коллектором и крышкой, а содержание газа в породе обусловлено сочетанием капиллярных сил с факторами катагенетических (вторичных) процессов, повлиявших на фильтрационно-емкостные свойства пород.

С технической точки зрения главное отличие между традиционными залежами и нетрадиционными скоплениями углеводородов заключается в невозможности получения промышленных дебитов газа без использования специальных технологий.

Разработка газогидратных месторождений базируется на процессе диссоциации (разделение), при которой газогидраты распадаются на газ и воду [1–5, 9, 10–27].

Предлагается три традиционных метода разработки залежей газогидратов: разгерметизация (снижение давления), нагревание и ввод ингибитора (рис. 1).

(А) – метод нагревания – введение теплоты или теплоносителя в зону стабильности газогидрата для диссоциации на газ и воду. Справа, синим цветом, показана геотерма, которая при нагревании пласта смещается и пересекает границу зоны стабильности газогидрата (обозначено синей пунктирной линией).

Преимуществами данной технологии являются простота и отсутствие необходимости в применении сложной техники.

К недостаткам нужно отнести высокие затраты энергии на нагревание и подведение теплоносителя к пласту; невозможность добычи из пластов глубокого залегания; относительно медленное и ограниченное по объемам разделение гидрата метана на газ и воду. Кроме этого, следует обратить внимание на необходимость постоянного увеличения объемов подводимой тепловой энергии и требование повышенных мер контроля при добыче газа из пластов в зоне вечной мерзлоты.

(Б) – метод разгерметизации – снижает давление в метаногидратных отложениях. Диаграмма справа показывает границу стабильности газогидрата (зеленая сплошная линия) до понижения давления. Зеленой пунктирной линией выделена граница стабильности после сброса давления. Диапазон изменения давления изображен пунктирной черной линией.

Преимуществами данной технологии являются сравнительно невысокие затраты; простота процесса извлечения газа и возможность относительно быстрой добычи больших объемов.

Недостатки данной технологии связаны с тем, что при низких температурах высвобождающаяся в ходе разгерметизации вода может замерзнуть и закупорить оборудование, что требует разработки и применения дополнительных технологий.

(С) – метод ввода ингибитора. Введение ингибитора в непосредственной близости от скважины приводит к диссоциации газового гидрата вследствие смещения границы стабильности газогидрата в сторону более низких температур, как показано справа. Диапазон изменения находится между красной линией границы стабильности и пунктирной черной линией для стабильности с ингибитором.

Среди преимуществ данной технологии: возможность контроля объемов добычи газа за счет объемов введения ингибитора; предотвращение замерзания воды, образования гидратов и закупорки оборудования скважины.

Недостатками данной технологии являются высокая стоимость; медленное протекание химической реакции ингибитора с газогидратом; экологическая опасность, которую могут представлять собой ингибиторы [11].

Наибольшие перспективы имеет комбинированный метод, состоящий в одновременном снижении давления и подводе тепла к скважине. При этом основное разложение гидрата происходит за счет 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.

Как альтернативный известен молекулярный метод, предусматривающий инъекцию в гидратную зону двуокиси углерода. Обработка гидрата CO₂ приводит к замене в его

структуре молекул метана на молекулы углекислого газа и высвобождению первого. Это позволяет добывать углеводородное топливо и одновременно захоранивать вредные продукты его сгорания. Данный метод не требует значительных затрат энергии на прогревание гидратного пласта или создание депрессии и обладает очевидным преимуществом – совмещением добычи газа из гидратов и захоронения CO₂, что способствует решению экологических проблем глобального потепления.

В последнее время в странах, обладающих огромными ресурсами газовых гидратов, активизировался поиск инженерных решений проблемы добычи углеводородов из газовых гидратов. Зарегистрировано большое количество патентов с перспективными методами получения углеводородов из газовых гидратов. Уверенно можно сказать, что ведущими странами в области патентного поиска способов добычи газа из газогидратных месторождений являются

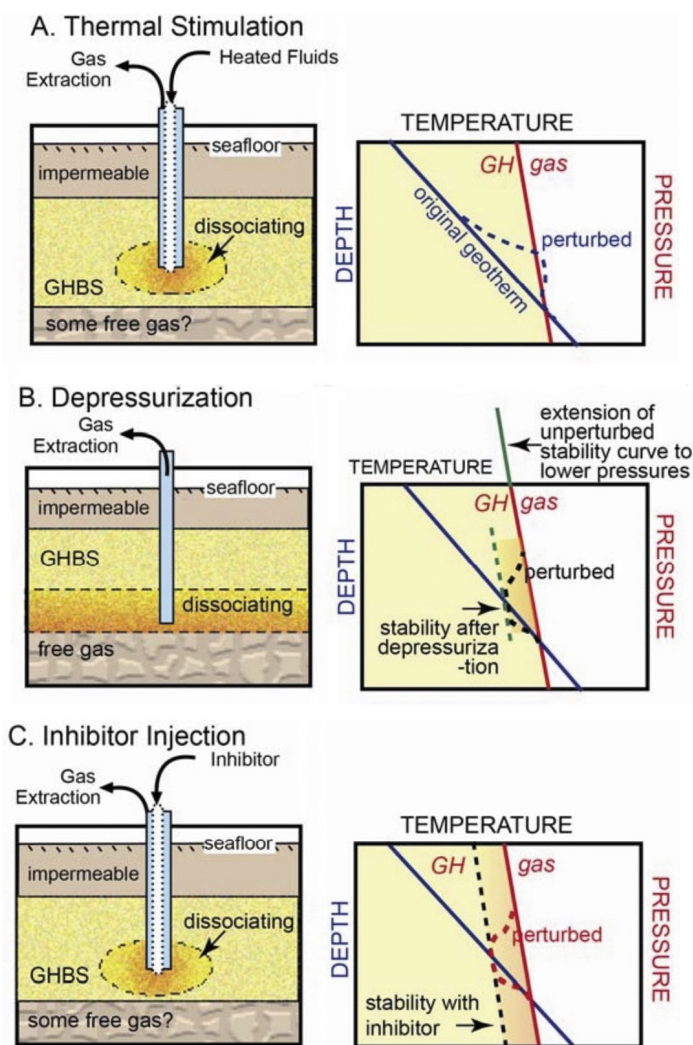


Рис. 1. Графическое изображение возможных традиционных способов получения газа из аквальных залежей газовых гидратов, который характеризуется метаногидратосодержащими отложениями (выделено желтым цветом и отмечено как GHBS – (methane hydrate-bearing sediments)), над отложениями со свободным газом (отмечено коричневым цветом как free gas). Методы разработки показаны на рисунках слева, а влияние способов добычи на пласт изображено справа. Отложения, в которых газогидрат находится на стадии диссоциации, обозначены в оттенках от желтого до оранжевого [24]

Россия, США, Япония, Канада и Китай. Так, к технологиям разработки газогидратных месторождений, предлагаемых в большинстве патентов, которые основаны на методе теплового воздействия, можно отнести:

- подвод тепла непосредственно к забою скважины с помощью циркуляции горячей воды и пара;
- использование забойных нагревательных устройств и теплоты, генерируемой от трения вращающихся деталей буровой колонны;
- проведение контролируемых экзотермических каталитических реакций в зоне залегания газогидратов, что дает возможность использовать выделяющееся тепло для разложения газогидратов и соответственно допускает промышленную добычу из них природного газа, а именно: в гидратосодержащий пласт закачивают одновременно жидкую кислоту и щелочь, которые, вступая в экзотермическую химическую реакцию между собой в породе, выделяют тепло для разложения гидратов (в качестве каталитических предлагаются такие реакции, как окисление метана в синтез-газ, CO_2 , воду, а также окисление в метанол непосредственно в зоне добычи);
- использование твердого адсорбента, способного поглощать пары воды с удельным тепловыделением, превышающим теплоту диссоциации твердого газогидрата;
- подачу горячих перенасыщенных растворов (CaCl_2 или CaBr_2) или их смеси под давлением вниз по скважине к зоне залегания гидратов, вследствие чего вода из гидратов абсорбируется солями с выделением тепла;
- осуществление в пласте экзотермической химической реакции жидкой кислоты и щелочи, в результате чего образуется горячий солевой раствор;
- построение систем разветвленных горизонтальных и наклонных скважин различной конфигурации и организация закачки горячего агента (горячей воды, пара), подаваемого с поверхности, через нагнетательные скважины, а отбора – через добывающие скважины;
- закачку под непроницаемую подошву газогидратного месторождения саморазогревающихся жидких радиоактивных отходов;
- использование термальной воды из нижележащих горизонтов или теплой морской воды или воды, взятой выше уровня залегания гидратов;
- нагрев пласта за счет организации внутрипластового горения гидратов и т. д.

К технологиям разработки газогидратных месторождений, основанным на методе введения ингибиторов, где предлагается пропускать через гидратный пласт химические реагенты, которые не образуют гидратов в пластовых условиях и способны растворять метановые гидраты, можно отнести использование пропана, нормального бутана или водного раствора, содержащих массовую долю формиата или ацетата щелочного металла от 10 до 75 % [7].

Известны также технологии механического разложения газогидрата на газ и воду, а именно использование погружного насоса с фрезерным разрыхлителем, механическое разрушение гидромотором и откачивание пульпы с разрушенной области, применение ударно-кавитационного воздействия и др.

Особенностью разработки аквальных залежей гидрата метана является необходимость создания эффективных систем сбора свободно всплывающего газа метана. Этот вопрос в подавляющем количестве запатентованных изобретений решается за счет применения “зонтичных” систем различной конструкции (рис. 2).

Существует еще одна группа изобретений, представляющих технологии извлечения газа из гидратов, расположенных под морским дном. В данных патентах предлагаются различные агрегаты для подъема гидратов в твердом состоянии на поверхность с последующей их диссоциацией на газ и воду. В качестве подъемника авторы изобретений используют эрлифт, восходящий поток жидкости, насос и т. д. Недостатком этой группы изобретений является сложность предлагаемых технических средств, пригодность их только для разработки придонных залежей гидратов, слабая проработка вопросов экологической и технологической безопасности. Необходимо отметить, что ни одно из этих изобретений еще не было апробировано на практике [7].

Отдельно можно выделить электромагнитные и акустические методы воздействия на гидратонасыщенную породу, но они пока изучены мало.

На основе систематизированных данных предлагаем упомянутые выше методы отнести к традиционным, как наиболее изученным и классическим. В свою очередь считаем целесообразным выделить в классификации ряд методов, которые подразумевают получение таких же результатов, но используют иные физические подходы, и обозначить их как нетрадиционные, способствующие разрушению газогидрата с использованием нанотехнологий и микроорганизмов (бактерий).

Суть нетрадиционных методов заключается в следующем.

1. Разрушение газогидрата наночастицами.

В данном методе предлагается использование различных наночастиц, соизмеримых с газогидратной ячейкой и подаваемых в составе гидродинамической струи для эффективного и безопасного разрушения газогидрата. Применение нанотехнологий (основанное на наночастицах или наноактуаторах-наномоторах) обеспечивает эффективную и последовательную проработку всей поверхности аквальной залежи газогидратов с необходимой скоростью их разрушения и получения запланированных объемов метана [6].

Механизм эффективного применения промышленных нанотехнологий при добыче аквальных газогидратов основывается на том, что основным структурным элементом газовых гидратов являются элементы, обладающие нано-

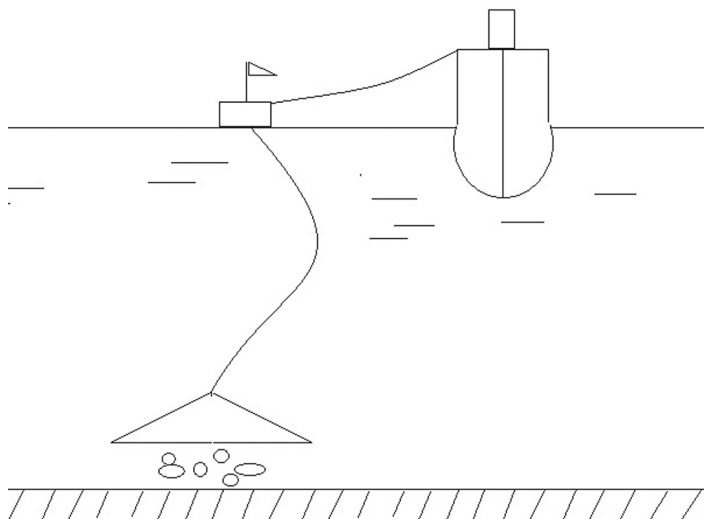


Рис. 2. Схема добычи газа метана из газывделяющих донных участков в виде фонтанов (факелов)

размерностью, представляющие собой кристаллические ячейки, состоящие из молекул воды, внутри которых и размещены молекулы газа.

При этом структура гидратов подобна структуре льда, но отличается от последней тем, что молекулы газа расположены внутри кристаллических решеток, а не между ними (рис. 3).

Для последовательного (не взрывного) промышленного разрушения клатратных соединений газогидратов (с целью эффективного извлечения содержащегося там метана) целесообразно подавать к ним наночастицы в составе неактивных водных струй в количестве, соответствующем запланированному количеству разрушаемых ячеек (клатратов) газогидратов. Главным является их соразмерность с разрушаемыми ячейками клатратов – газовых гидратов.

Эффективность разрушения газогидратов существенно зависит также от формы наночастиц, в частности от наличия у них различных шипов. При перемещении сферической частицы, обладающей шипами, вдоль поверхности ячейки (клатрата) газогидратов происходит периодическое поднятие и опускание острия шипа, что приводит к разрушению кристаллической ячейки и высвобождению молекулы метана.

Наноструктуры, которые выглядят как морские ежи, довольно легко формируются электрохимическим методом. Основным материалом для их строительства является полистирол [9].

Кроме шарообразных наночастиц, в качестве рабочего инструмента, разрушающего наногидратные залежи, более целесообразно применять различные так называемые молекулярные шестерни и соединенные осью колеса.

Валами шестеренок в подобной коробке передач являются углеродные нанотрубки, а зубцами служат молекулы бензола. При этом характерные частоты вращения шестеренок составляют несколько десятков гигагерц.

Для разрушения ячеек газогидратов наночастицами может быть использована не только энергия гидродинамического потока.

В частности, одним из важных и перспективных направлений применения нанотехнологий в нефтяной и газовой промышленности является создание специальных миниатюрных устройств, оснащенных микропроцессорами и способных выполнять целенаправленные операции с объектами нанометровых масштабов, называемых “нанороботами” [6].

Согласно современным теориям, нанороботы должны уметь осуществлять двустороннюю коммуникацию: реагировать на различные сигналы и быть в состоянии подзарядиться или перепрограммироваться извне (посредством звуковых или электрических колебаний).

Также важными представляются их функции репликации – самосборки новых нанороботов и программированного самоуничтожения, например, по окончании работы. В этом случае роботы должны распадаться на экологически безвредные и быстровыводимые компоненты.

В качестве энергии движения наномоторов могут выступать различные химические реакции, энергия света, звука (механических колебаний), электромагнитное поле и электрический ток.

Предполагается, что нанотехнологии могут обеспечить как эффективную и последовательную разработку всей поверхности аквальной залежи газогидратов, так и необходимую скорость их разрушения и получения запланированных объемов метана.

2. Разрушение газогидрата микроорганизмами (бактериями).

В своей работе авторы обращают внимание на то, что в науке и технике по мере более глубокого проникновения в суть вещей и явлений наблюдается все большее приближение к природным “техническим устройствам”. И если пока технический уровень изделий, изготовленных человеком, или эффективность технологических процессов все же отстают от природных аналогов, то поневоле напрашивается мысль использовать их в готовом виде. В этом, возможно, и заключается смысл биотехнологических подходов.

Человечество давно использует для своих нужд оба биологических царства – растительное и животное. Сейчас наступило время, когда мы вплотную подошли к тому, чтобы извлекать пользу из всех возможностей третьего биологического царства – царства микроорганизмов.

Как известно, микробиология занимает сегодня ведущее положение среди научных дисциплин, наиболее активно проявивших себя на стыке наук.

Бактерий много в почве, на дне озер и океанов – повсюду, где накапливается органическое вещество.

Многие бактерии обладают химическими рецепторами, которые регистрируют изменения кислотности среды и концентрацию различных веществ, например сахаров, аминокислот, кислорода и диоксида углерода. Многие подвижные бактерии реагируют также на колебания температуры, а фотосинтезирующие виды – на изменения освещенности. Некоторые бактерии воспринимают направление силовых линий магнитного поля, в том числе магнитного поля Земли, с помощью присутствующих в их клетках частичек магнетита.

Бактерии бывают автотрофами и гетеротрофами. Автотрофы не нуждаются в веществах, произведенных другими организмами. В качестве главного или единственного источника углерода они используют его диоксид (CO₂). Гетеротрофы используют в качестве основного источника углерода органические вещества, синтезированные другими организмами.

Для образования клеточных компонентов бактерий используется световая энергия или окисление химических веществ.

В первом случае фототрофные бактерии делятся на фотогетеротрофов и фотоавтотрофов в зависимости от того, какие соединения – органические или неорганические – служат для них главным источником углерода.

Фотоавтотрофные цианобактерии за счет световой энергии расщепляют молекулы воды. При этом выделяется свободный кислород и образуется водород, который, превращает диоксид углерода в углеводы. У зеленых и пурпурных серных бактерий световая энергия используется для расщепления не воды, а других неорганических молекул, например сероводорода. В результате также образуется водород, восстанавливающий диоксид углерода, но кислород не выделяется. Такой фотосинтез называется аноксигенным.

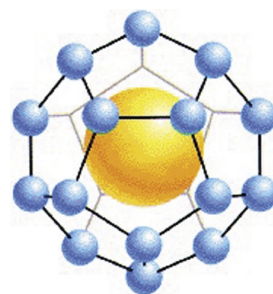


Рис. 3. Упаковка метана в газогидратах [27]

Фотогетеротрофные бактерии, например пурпурные несерные, используют световую энергию для получения водорода из органических веществ, в частности изопропанола.

Во втором случае бактерии называются хемогетеротрофами или хемоавтотрофами в зависимости от того, какие молекулы служат главным источником углерода – органические или неорганические. У хемогетеротрофов органика дает как энергию, так и углерод. Хемоавтотрофы получают энергию при окислении неорганических веществ, например водорода.

Благодаря большому разнообразию синтезируемых ферментов бактерии могут выполнять многие химические процессы более эффективно и экономично, чем если бы эти процессы проводились химическими методами. Изучение биохимической деятельности микроорганизмов позволило подобрать условия для максимальной активности их как продуцентов различных полезных ферментов – возбудителей нужных химических реакций и процессов. Микроорганизмы все шире применяются в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве и медицине [4].

Механизм применения бактерий при добыче аквальных газогидратов основывается также на том, что газогидрат состоит из молекул воды, внутри которых размещены молекулы газа. При этом в процессе жизнедеятельности бактерии должен выделяться газ, замещающий в структуре клатрата молекулу метана на молекулу данного газа. К тому же процесс должен быть контролируемым за счет использования внешних факторов, которые обеспечивают питание бактерии, но в любой момент могут быть прекращены – свет, химические вещества, электромагнитное излучение и др., что в природных условиях образования газогидрата отсутствует.

Однако для последующей эффективной разработки залежей газогидратов имеет важное значение механизм их возникновения и формирования уже не как отдельной частицы-клатрата. Так, в целом механизм формирования газогидратных залежей определяется многими, зачастую стохастическими факторами [15]: интенсивностью генерации и особенностями миграции углеводородов, составом газа, степенью газонасыщенности и минерализации вод, литологической характеристикой разреза, структурой пористой среды, термодинамическим режимом разреза вмещающих пород, геотермическим градиентом в зоне гидратообразования и подстилающих породах, фазовым состоянием гидратообразователей и др.

Вывод. Знание кинетики и морфологии образования залежей газогидратов, их видов (порфировидные, массивные, грануловидные, жилы, прожилки и т. д.), а также особенностей их перемешивания при формировании с илом и илистыми частицами будет способствовать разработке более эффективных технологий их освоения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басниев К. С., Кульчицкий В., Шебетов А. В., Нифантова А. В. Способы разработки газогидратных месторождений//Газ. пром-сть. – 2006. – № 7. – С. 22–24.
2. Басниев К. С., Шебетов В., Назаретова А. А. и др. Способы добычи газа из газогидратных месторождений//Газ. пром-сть. – 2007. – № 11. – С. 84–86.
3. Бондаренко В. И., Ганушевич К. А., Сай Е. С. К вопросу скважинной подземной разработки газовых гидратов//Науковий вісник НГУ. – 2011. – Т. 1. – С. 60–66.
4. Бухар М. Популярно о биотехнологии. АНФ. – М., 2012. – 217 с.
5. Власов С. Ф., Бабенко В. Э. Обоснование способа добычи газа из газогидратных залежей Черного моря//Национальный горный университет. Сборник научных трудов. – Дніпро: НГУ, 2017. – № 52. – С. 57–65.
6. Воробьев А. Е. Перспективы нанотехнологий освоения газогидратных ресурсов арктического шельфа России//Вестник МГТУ. – Т. 19. – № 1/1. – 2016. – С. 70–81.
7. Воробьев А. Е., Капитонова И. Л. Основы добычи аквальных газовых гидратов. – Москва: Российский университет дружбы народов, 2012. – 106 с.
8. Воробьев А. Е., Янковский А. В., Голубченко М. В. Обзор мировой технологии добычи газа из газовых гидратов//Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2015. – С. 90–94.
9. Воробьев А. Е. Основы механизма эффективного применения промышленных нанотехнологий при добыче аквальных газовых гидратов//Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2014. – № 6(28). – С. 102–108.
10. Воронов В. П., Городецкий Е. Е., Муратов А. Р., Сафонов С. С. Экспериментальное исследование процесса замещения метана в газовом гидрате углекислым газом//Докл. АН. – 2009. – Т. 429. – № 2. – С. 257–259.
11. Газогидраты: технологии добычи и перспективы разработки. Информационная справка. Дирекция по стратегическим исследованиям в энергетике. – М., 2013. – 22 с.
12. Гошовский С. В., Зурьян А. В. Газогидратные залежи: формирование, разведка и освоение//Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2017. – № 4/50. – С. 65–78.
13. Жуков А. В., Звонарев М. И., Жукова Ю. А. Способ добычи газа из глубоководных месторождений газогидратов//Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – М., 2013. – №10. – С. 16–20.
14. Кунсбаева Г. А. “Шахтный” способ добычи газа из подводных газогидратных массивов//Трибуна молодого ученого. Актуальные проблемы науки глазами молодежи: материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов и аспирантов с междунар. участием. Мурманск. 16–19 апр. 2012. Т. 2. – Мурманск: МГТУ, 2012. – С. 17–18.
15. Маконо Ю. Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы//Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). – 2003. – Т. XLVII. – № 3. – С. 70–79.
16. Максимова Э. А. Разработка месторождений газовых гидратов на основе теплового воздействия на залежь//Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Вип. 2/2015 (91). – С. 90–95.
17. Максимова Э. А. Принцип выбора схемы разработки природных месторождений газовых гидратов на основе анализа процессов теплопереноса//Науково-технічний збірник “Розробка родовищ”. – НГУ. – 2015. – С. 275–281.
18. Матвеева Т. В. Способ добычи газа из придонных субаквальных скоплений газовых гидратов//Горный журнал. – 2012. – № 3. – С. 81–85.
19. Решетников А. А., Голованчиков А. Б. Образование газогидратов и способы их добычи//Известия Волгоградского гос-го ун-та: межвуз. сб. науч. ст. ВолгГТУ Сер. Реология, процессы и аппараты хим. технологии. – Волгоград. – 2010. – Вып. 1(61). – С. 5–7.
20. Тохиди Б., Архманди М., Андерсон Р., Ян Ц. Исследования низкодозированных ингибиторов гидратов в университете Херриот-Ватт//Наука и техника в газовой пром-сти. – 2004. – № 1–2. – С. 81–89.
21. Чжан Ю. Извлечение метана из газовых гидратов в морской среде путем пузырьковых извержений (англ.)//Геофизический научный сборник геологического Департамента Мичиганского университета. – Мичиган, США, 2003. – Т. 30. – № 7. – С. 511–514.
22. Шагапов В. Ш., Сыртланов В. Р. Диссоциация газовых гидратов в пористой среде при депрессии и нагреве поверхностными и объемными источниками тепла//Нефть и газ Зап. Сибири: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., 21–23 мая 1996. Тюмень, 1996. – Т. 2. – С. 71–72.
23. Шагапов В. Ш., Хасанов М. К., Гималтдинов И. К., Столповский М. В. Особенности разложения газовых гидратов в пористых средах при нагнетании теплого газа//Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20. – № 3(81). – С. 347–354.
24. Шагапов В. Ш., Чиглицева А. С., Сыртланов В. Р. О возможности вымывания газа из газогидратного массива циркуляцией теплой воды//Теплофизика, гидродинамика, теплотехника: Сбор-

ник статей. – Вып. № 4. – Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. ун-та, 2008. – С. 151–161.

25. *Carolyn Ruppel*. Methane Hydrates and the Future of Natural Gas, MITEI Natural Gas Report, Supplementary Paper on Methane Hydrates, 2011. – P. 71–72.

26. *Cui Y., Lu C., Wu M., Peng Y., Yao Y., Luo W.* Review of exploration and production technology of natural gas hydrate. *Advances in Geo-Energy Research*, 2018, 2(1): P. 53-62, doi: 10.26804/ager. 2018.01.05.

27. *Si Na, An Lei, Deng Hui, Sun Jian, Guang Xinjun.* Discussion on natural gas hydrate production technologie, China petroleum exploration. – Vol. 21. – No. 5, 2016. – P. 71–72.

REFERENCES

1. *Basniev K. S., Kulchickij V., Shhebetov A. V., Nifantova A. V.* Methods for developing gas hydrate deposits//Gaz. prom-st. – 2006. – № 7. – P. 22–24. (In Russian).

2. *Basniev K. S., Shhebetov V., Nazaretova A. A.* i dr. Methods of extracting gas from gas hydrate deposits//Gaz. prom-st. – 2007. – № 11. – P. 84–86. (In Russian).

3. *Bondarenko V. I., Ganushevich K. A., Saj E. S.* On the issue of downhole underground development of gas hydrates//Naukoviy visnyk NHU. – 2011. – Vol. 1. – P. 60–66. (In Russian).

4. *Buhar M.* Popular about biotechnology. ANF. – Moskva, 2012. – 217 p. (In Russian).

5. *Vlasov S. F., Babenko V. Je.* Substantiation of the method of gas extraction from the gas-hydrate deposits of the Black Sea//Nacionalnyj gornyj universitet. Sbornik nauchnyh trudov. – Dnipro: NGU, 2017. – № 52. – P. 57–65. (In Russian).

6. *Vorobjov A. E.* Prospects of nanotechnology for the development of gas hydrate resources of the Arctic shelf of Russia//Vestnik MGTU. – Vol. 19. – № 1/1. – 2016. – P. 70–81. (In Russian).

7. *Vorobjov A. E., Kapitonova I. L.* Basics of extraction of aqual gas hydrates. – Moskva: Rossijskij universitet druzhby narodov, 2012. – 106 p. (In Russian).

8. *Vorobjov A. E., Jankevskij A. V., Golubchenko M. V.* Overview of world technology of gas production from gas hydrates//Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya. – 2015. – P. 90–94. (In Russian).

9. *Vorobjov A. E.* Fundamentals of the mechanism of effective application of industrial nanotechnologies in the extraction of aqual deposits of gas hydrates//Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. – 2014. – № 6(28). – P. 102–108. (In Russian).

10. *Voronov V. P., Gorodeckij E. E., Muratov A. R., Safonov S. S.* Experimental study of the process of methane replacement in gas hydrate by carbon dioxide//Doklady Akademii nauk. – 2009. – Vol. 429. – № 2. – P. 257–259. (In Russian).

11. Gas hydrates: production technologies and development prospects. Informatsionnaya spravka. Direktsiya po strategicheskim issledovaniyam v energetike. – Moskva, 2013. – 22 p. (In Russian).

12. *Goshovskiy S. V., Zurian O. V.* Gas hydrate deposits: formation, exploration and development//Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana. – 2017. – № 4/50. – P. 65–78. (In Russian).

13. *Zhukov A. V., Zvonarev M. I., Zhukova Yu. A.* Method of gas production from deep water gas hydrate deposits//Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamentalnyh issledovaniy. – 2013. – № 10. – P. 16–20. (In Russian).

14. *Kunsbaeva G. A.* “Mine” method of extracting gas from underwater gas hydrate arrays//Tribuna molodogo uchjonogo. Aktualnye problemy nauki glazami molodezhi: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov i aspirantov s mezhdunar. uchastiem. Murmansk. 16–19 apr. 2012. Vol. 2. – Murmansk: MGTU, 2012. – P. 17–18. (In Russian).

15. *Makogon Yu. F.* Natural gas hydrates: distribution, models of education, resources//Ros. him. zh. (Zh. Ros. him. ob-va im. D. I. Mendeleeva). – 2003. – Vol. XLVII. – № 3. – P. 70–79. (In Russian).

16. *Maksimova Je. A.* Development of gas hydrate deposits based on thermal effects on the reservoir//Visnyk KrNU imeni Myhaila Ostrohradskoho. – Iss. 2/2015 (91). – P. 90–95. (In Russian).

17. *Maksimova Je. A.* The principle of choosing a scheme for the development of natural gas hydrate deposits based on analysis of heat transfer processes//Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk “Rozrobka rodovysch” – NHU. – 2015. – P. 275–281. (In Russian).

18. *Matveeva T. V.* Method of extracting gas from near-bottom sub-aqual clusters of gas hydrates//Gorn. zhurnal. – 2012. – № 3. – P. 81–85. (In Russian).

19. *Reshetnikov A. A., Golovanchikov A. B.* Formation of gas hydrates and methods of their extraction//Izvestiya Volgogradskogo gos-go un-ta: mezhvuz. sbornik nauch. st. VolGTU//Seriya Reologiya, processy i apparaty him. tehnologii. – Volgograd. – 2010. – Iss. 1(61). – P. 5–7. (In Russian).

20. *Tohidi B., Arhmandi M., Anderson R., Yan C.* Studies of low-dose hydrate inhibitors at Heriot-Watt University//Nauka i tehnika v gazovoj prom-sti. – 2004. – № 1–2. – P. 81–89. (In Russian).

21. *Chzhan Yu.* Methane recovery from gas hydrates in the marine environment by bubble eruptions//Geofizicheskij nauchnyj sbornik geologicheskogo Departamenta Michiganskogo universiteta. – Michigan, USA, 2003. – Vol. 30. – № 7. – P. 511–514. (In Russian).

22. *Shagapov V. Sh., Syrtilanov V. R.* Dissociation of gas hydrates in a porous medium under depression and heating by surface and volumetric heat sources//Neft i gaz Zap. Sibiri: Tez. dokl. mezhdunar. nauch.-tehn. konf., 21–23 maya 1996. Tyumen, 1996. – Vol. 2. – P. 71–72. (In Russian).

23. *Shagapov V. Sh., Hasanov M. K., Gimaltdinov I. K., Stolpovskij M. V.* Features of decomposition of gas hydrates in porous media during the injection of a warm gas//Teplofizika i aeromehanika. – 2013. – Vol. 20. – № 3(81). – P. 347–354. (In Russian).

24. *Shagapov V. Sh., Chiglineva A. S., Syrtilanov V. R.* On the possibility of leaching gas from the gas hydrate array by circulating warm water//Teplofizika, gidrodinamika, teplotehnika: Sbornik Statej. – Iss. № 4. – Tyumen: Izd-vo Tyumen. gos. un-ta, 2008. – P. 151–161. (In Russian).

25. *Carolyn Ruppel*. Methane Hydrates and the Future of Natural Gas, MITEI Natural Gas Report, Supplementary Paper on Methane Hydrates, 2011. – P. 71–72.

26. *Cui Y., Lu C., Wu M., Peng Y., Yao Y., Luo W.* Review of exploration and production technology of natural gas hydrate. *Advances in Geo-Energy Research*, 2018, 2(1): P/ 53-62, doi: 10.26804/ager. 2018.01.05.

27. *Si Na, An Lei, Deng Hui, Sun Jian, Guang Xinjun.* Discussion on natural gas hydrate production technologie, China petroleum exploration. – Vol. 21. – No. 5, 2016. – P. 71–72.

Рукопис отримано 20.09.2018.

