

УДК 552.578.1

А. Е. Воробьев

Перспективы нанотехнологий освоения газогидратных ресурсов арктического шельфа России

A. E. Vorob'yev

Prospects of nanotechnologies of developing gaseous-hydrate resources of the Russian Arctic shelf

Аннотация. В статье содержится анализ углеводородных запасов арктического шельфа России. Представлена экспертная количественная оценка объема метана, содержащегося в аквальных залежах региона (как в абсолютном выражении, так и по отдельным объектам). Рассмотрены угрозы со стороны изменения климата по отношению к сохранности минерально-сырьевой базы аквальных газовых гидратов арктического шельфа России. Дана экономическая оценка существующим технологиям разработки аквальных залежей газовых гидратов данного шельфа, представлены инновационные методы их освоения на базе применения наночастиц и наномоторов.

Abstract. The paper contains the analysis of hydrocarbonic stocks of the Russian Arctic shelf. The expert quantitative assessment of methane volume in sea deposits of the region (both in absolute expression, and on separate objects) has been presented. Threats from climate change in relation to safety of mineral resources of sea gas-hydrates of the Arctic shelf of Russia have been considered. The economic assessment has been given to the existing technologies of developing sea deposits of gas-hydrates of the shelf; the innovative methods of their development on the basis of application of nanoparticles and nanomotors have been presented.

Ключевые слова: Арктика, шельф, газогидраты, экономика, разработка, наночастицы и нанотехнологии.

Key words: Arctic, shelf, gas-hydrates, economy, development, nanoparticles and nanotechnologies.

Введение

Человечеству для жизнеобеспечения необходимо постоянное использование энергии. Поэтому в настоящее время потребление всех видов ресурсов (в том числе и энергетических) растет экспоненциально (табл. 1, рис. 1), следовательно, резко возросший интерес к газогидратной тематике неудивителен.

Таблица 1

Потребление энергии на одного человек (ккал/сут)

Период	Величина потребления
Каменный век	4 000
Аграрное общество	12 000
Индустриальная эпоха	70 000
Наше время	250 000
XXI век (прогноз)	300 000

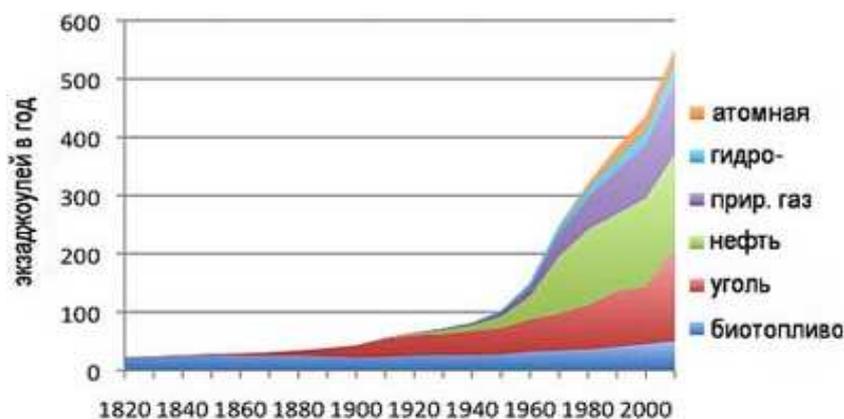


Рис. 1. Структура и параметры мирового энергопотребления¹

¹ Динамика мирового энергопотребления за последние 200 лет. URL: http://bio-energy.com.ua/index.php?Itemid=127&catid=45:2012-08-04-18-07-21&id=1195:energetika&option=com_content&view=article.

Так, в 2008 г. общее мировое потребление энергии составило 474 ЭДж ($474 \cdot 10^{18}$ Дж или 132000 ТВт·ч). В будущем эти цифры будут только расти: в частности, если потребление электроэнергии на душу населения в США характеризуется показателем 10,8 МВт·ч, то, например, в Китае и других странах оно составляет лишь 2 МВт·ч. Поэтому неизбежен рост объемов используемых энергоносителей (в том числе горючего газа), что предполагает и совершенствование технологий их разработки.

Район и объекты исследования

Проведенные геолого-разведочные работы показали, что нефтегазовые перспективы России в XXI в. связаны с освоением шельфа ее арктических морей, где по оценкам различных специалистов находится свыше 100 млрд т углеводородов в нефтяном эквиваленте.

В частности, по мнению С. Богданчикова (ОАО "НК "Роснефть"), на Арктическом шельфе России сосредоточено до 80 % ее всех потенциальных углеводородных ресурсов. При этом наиболее изученной является территория Западной Арктики – шельфы Баренцева, Печорского и Карского морей². Так, по данным Министерства природных ресурсов, начальные извлекаемые ресурсы углеводородов в этом регионе составляют величину 62 млрд т.у.т. Необходимо отметить, что большинство из 13 открытых в западной части Арктики углеводородных месторождений относятся к крупным, а несколько – даже к уникальным объектам.

Остальной российский Север в геологическом отношении еще практически мало изучен. Тем не менее было установлено, что начальные извлекаемые углеводородные ресурсы моря Лаптевых составляют 3,7 млрд т.у.т., Восточно-Сибирского моря – 5,6 млрд т.у.т. и Чукотского моря – 3,3 млрд т.у.т.

Но есть и нетрадиционные (к тому же – неконвенционные, т. е. не подлежащие обязательному согласованию с другими странами при их разработке) углеводороды – газовые гидраты. По различным экспертным оценкам, в газогидратных залежах содержится примерно 20 000–21 000 трлн м³ метана, т. е. потенциальные запасы метана в газогидратах оцениваются величиной $2 \cdot 10^{16}$ м³.

Газовые гидраты являются единственным пока все еще не разрабатываемым, но весьма перспективным источником природного газа на Земле, который может составить реальную конкуренцию традиционным углеводородам: в силу наличия огромных ресурсов, широкого распространения на планете, неглубокого залегания и весьма концентрированного состояния (1 м³ природного метаногидрата содержит около 164 м³ метана в газовой фазе и 0,87 м³ воды).

Однако для эффективного их освоения необходимо обоснование и разработка принципиально новых технологий, обеспечивающих контролируемое разрушение газогидратных клатратов (ячеек).

Обсуждение и результаты

В настоящее время исследовательские работы по аквальной газогидратной тематике ведут Россия, Норвегия, США, Канада, Германия, Нидерланды, Япония, Китай, Индия и даже Южная Корея.

Так, Южная Корея планирует начать бурение для добычи метана из залежей газовых гидратов шельфа в Японском море³. Первое месторождение газовых гидратов (со 130-метровой мощностью газоносного пласта) в данном районе обнаружено в 135 км к северо-востоку от южнокорейского портового города Пхохан.

Большинство природных газов (CH₄, C₂H₆, C₃H₈, CO₂, N₂, H₂S, изобутан и т. п.) образуют гидраты или клатраты – кристаллические структуры, в которых газ находится в окружении молекул воды (рис. 2), удерживаемых вместе низкой температурой и высоким давлением окружающей водной среды.

Их образование и объемы определяются постоянной дегазацией мантии Земли. Если газы попадают в почву, то там они частично ассимилируются и разлагаются многочисленными микроорганизмами, а большей частью – депонируются земной атмосферой.

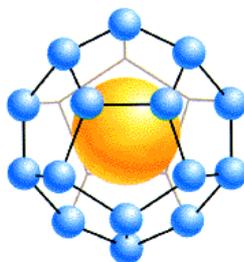


Рис. 2. Упаковка метана в газогидратах

² Криогенные газовые гидраты в субмаринной мерзлоте. URL: <http://www.myshared.ru/slide/98762>.

³ Корея начнет бурение в поисках газогидратов [Электронный ресурс]. URL: http://www.gas-journal.ru/online/foreign.php?ELEMENT_ID=18670.

Если газы попадают в акватории (проходят через их дно), то при наличии определенных условий (прежде всего – низкой температуры и большого давления) из них синтезируются аквальные газогидраты с формированием их залежей (рис. 3).



Рис. 3. Выход аквальной залежи газогидратов на дне акватории

Основными поставщиками донного метана в необходимых концентрациях являются газопроводящие разломы морского (океанического) дна, сипы и грязевые вулканы. Так, в Баренцевом море наиболее изученным крупным подводным грязевым вулканом является *Hakon Mosby Mud Volcano*, расположенный на глубине 1 250 м (рис. 4).

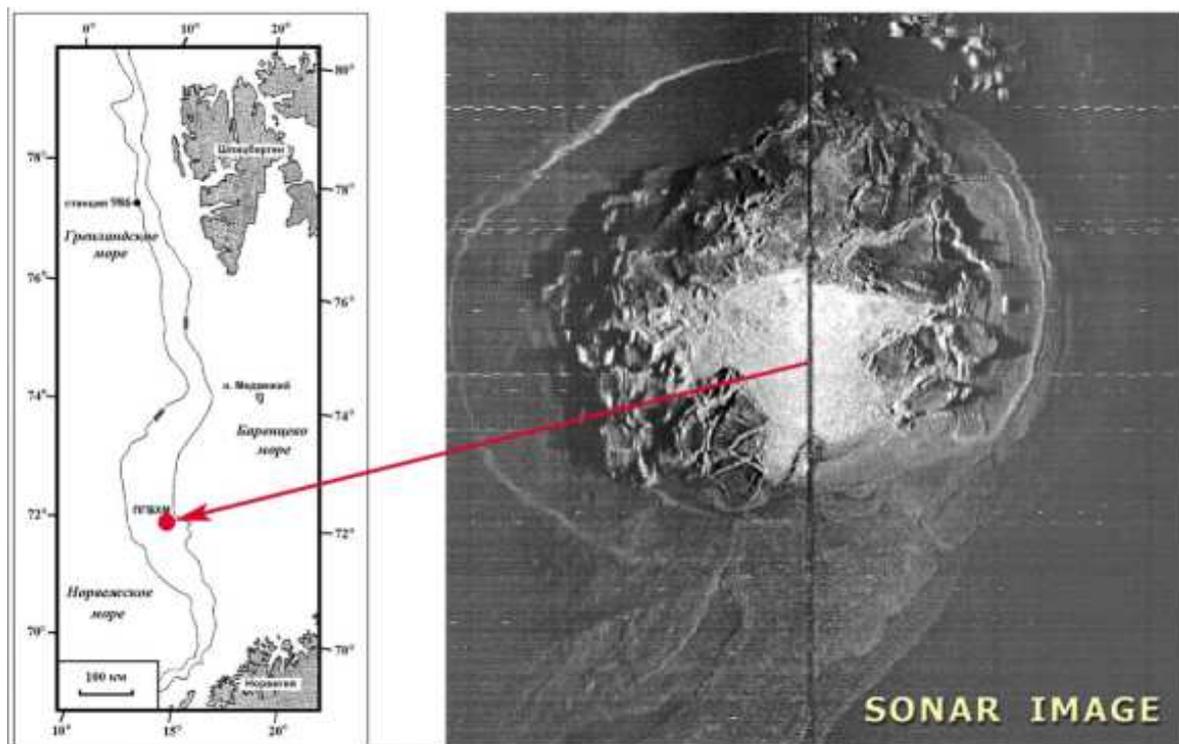


Рис. 4. Вид подводного грязевого вулкана Хаакон Мосби (по материалам исследований ВНИИОкеангеология)

Этот подводный вулкан представляет собой округлое образование диаметром около 1 км, возвышающееся над морским дном примерно на 10 м. Действующий в настоящее время вулкан извергает из себя значительные объемы грязи и газов (среди которых более 99 % составляет метан). Эти вещества поступают в вулкан из верхних слоев литосферы по каналу с глубины 2–3 км. По различным экспертным расчетам данный вулкан выбрасывает от 200 до 650 т/год метана.

Формирование аквальных гидратов метана, т. е. его соединений с водой, происходит под воздействием довольно высокого давления и низкой температуры – условия, характерные для дна морских и океанских шельфов.

Залежи аквальных гидратов метана образуются в пределах верхних 1,5 км отложений морского дна (при этом эшелон глубины 200–800 м ниже уровня морского дна рассматривается как наиболее перспективный

для их промышленной разработки). Мощность залежи аквальных газогидратов зависит от глубины акватории и температуры ее придонных вод и колеблется от 100 м до 300–350 м (в северных морях на глубинах шельфа около 1 000 м).

Арктический шельф Северного Ледовитого океана занимает особое место в ряду других акваторий Земли из-за наличия обширной субмаринной криолитозоны, с которой и связано образование многочисленных залежей газогидратов (рис. 5). На этой карте видно, что зоны возможной газогидратоносности весьма обширны и, по-видимому, могут рассматриваться в качестве весьма важных источников углеводородов в будущем.

Термобарические условия существования аквальных газогидратов характерны для большей части дна Мирового океана с глубинами воды более 300–400 м. На арктическом шельфе зона стабильности газовых гидратов связана с наличием субмаринной криолитозоны и может существовать при значительно меньшей глубине воды (если подошва криолитозоны находится на глубине более 260 м от уровня моря).

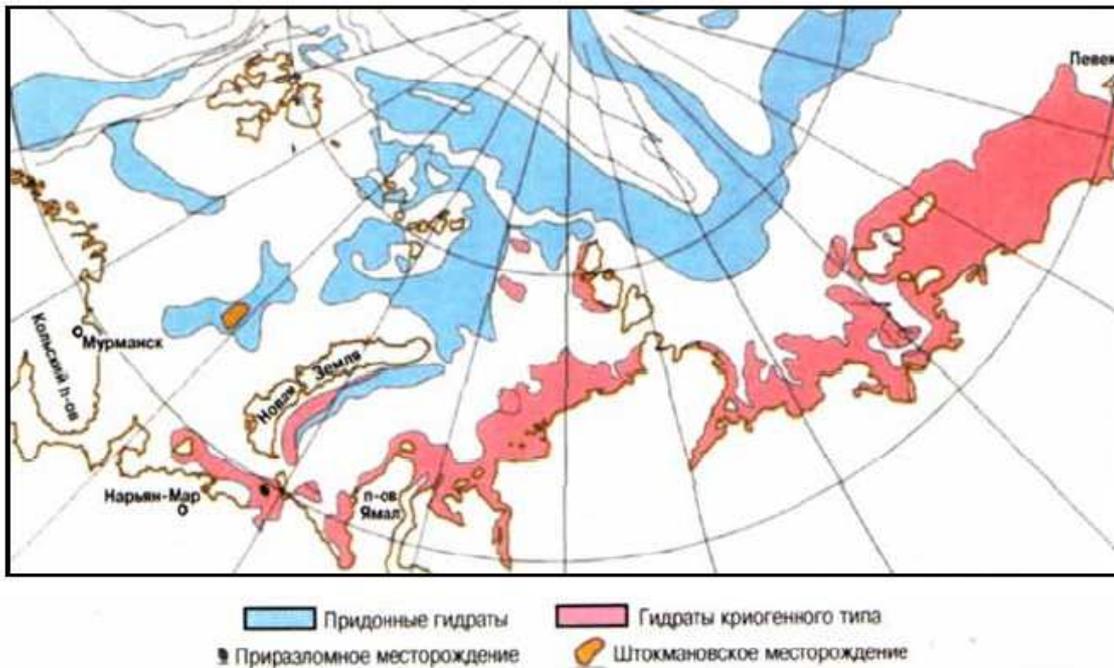


Рис. 5. Газогидратоносные области Северного Ледовитого океана⁴

В частности, низкотемпературные потенциально гидратоносные осадки занимают центральную, северо- и юго-восточную части Баренцева моря, примыкающие к арх. Новая Земля (рис. 6).

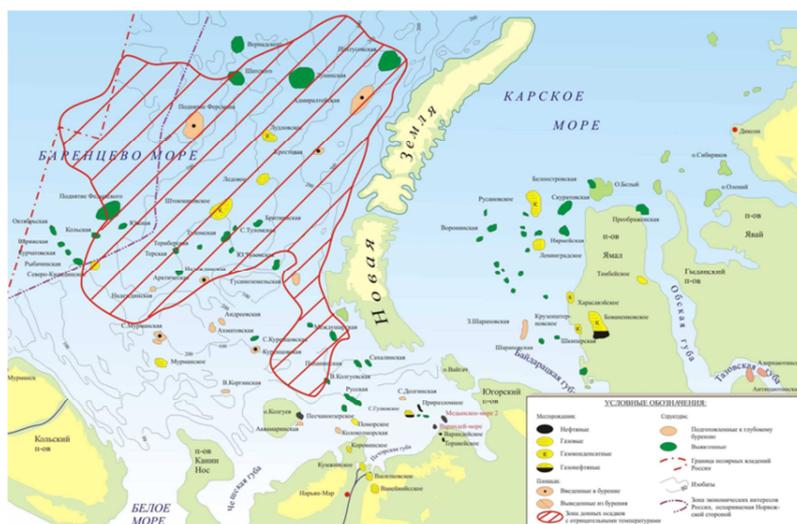


Рис. 6. Карта части арктического шельфа России и донных осадков с отрицательными температурами в Баренцевом море [1]

⁴ Атлас "Геология и полезные ископаемые шельфов России". М. : ГИН РАН, 2004.

В ходе экспедиционных исследований были получены необходимые количественные данные и показатели, характеризующие зону стабильности залежей газогидратов на дне Северного Ледовитого океана (табл. 2): морфоструктуры, различные типы, площади, мощности и объемы.

Таблица 2

Показатели зоны стабильности газовых гидратов дна Северного Ледовитого океана [2]

Основная морфоструктура	Тип зоны стабильности гидратов	Площадь, тыс. км ² (% от общей площади)	Предел изменения мощности (средняя мощность, м)	Объем, м ³
Ложе океана	Придонный	3 431	200–1 000 (700)	$2,4 \cdot 10^{15}$
Континентальный склон	Придонный	950	200–800 (560)	$5,3 \cdot 10^{14}$
	Придонный	977	0–600 (200)	$1,95 \cdot 10^{14}$
Арктический шельф России	Непридонный контролируемый реликтовой мощностью более 100 м	250 (125)	0–400 (200)	$2,5 \cdot 10^{13}$
	То же, мощностью до 100 м	606 (121)	0–400 (200)	$2,4 \cdot 10^{13}$
	Непридонный, вне акваторий с реликтовой мерзлой зоной	24	0–200 (100)	$2,4 \cdot 10^{12}$
Всего:				$3,18 \cdot 10^{15}$

Результаты подобных исследований в совокупности с их научной интерполяцией и экспертными оценками позволили рассчитать объемы потенциальных ресурсов метана в имеющихся газогидратных залежах основных геоморфологических структурах дна Северного Ледовитого океана (рис. 7).

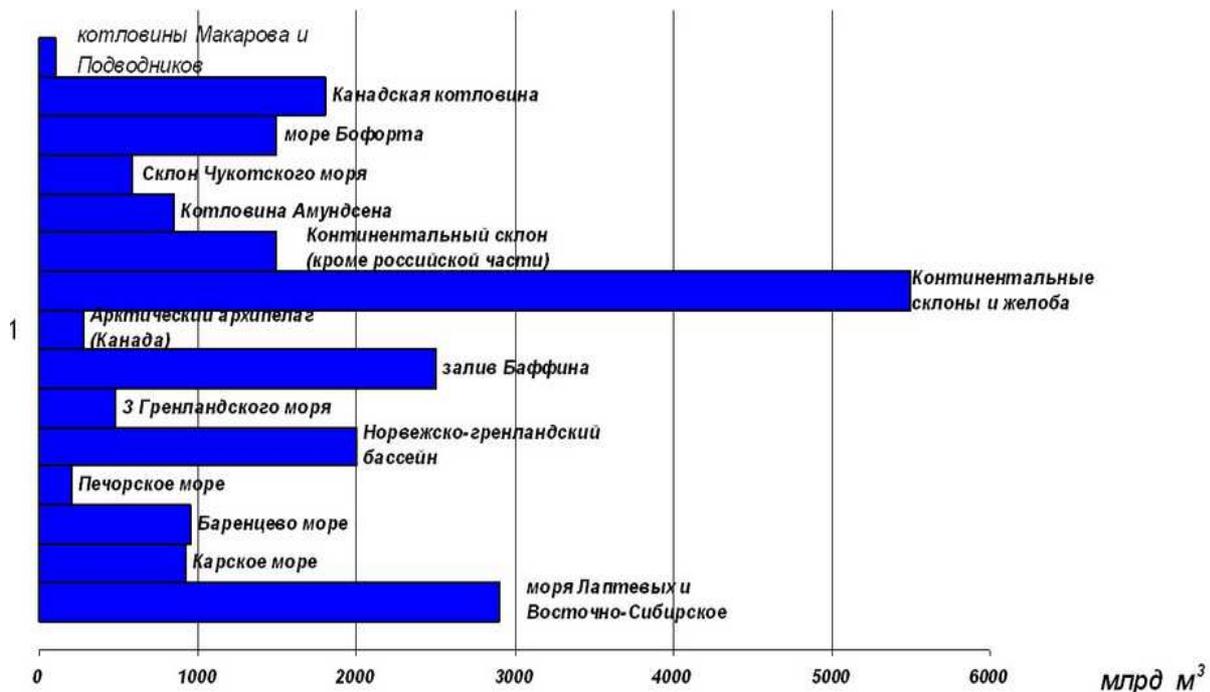


Рис. 7. Потенциальные ресурсы газа в гидратах Северного Ледовитого океана⁵

Но в состоянии шельфовой аквальной газогидратной сырьевой базе существует определенная угроза – это глобальное потепление климата.

⁵ Криогенные газовые гидраты в субмаринной мерзлоте. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.myshared.ru/slide/98762>.

В частности, в настоящее время вечная мерзлота в Западной Сибири оттаивает на 4 см/год, в ближайшие 20 лет ее граница сдвинется на север примерно на 80 км. Такая же ситуация с таянием льдов в Арктике. Так, если в 1979 г. площадь арктических льдов имела величину, равную 7,2 млн км², то уже в 2007 г. она составила 4,3 млн км². К тому же толщина ледяного покрова здесь за этот период уменьшилась примерно вдвое [3; 4]. Заметно теплеет и вода морей и океанов (даже на глубине до 2 тыс. м). Газовые гидраты устойчивы только при низкой температуре и повышенном давлении (рис. 8).

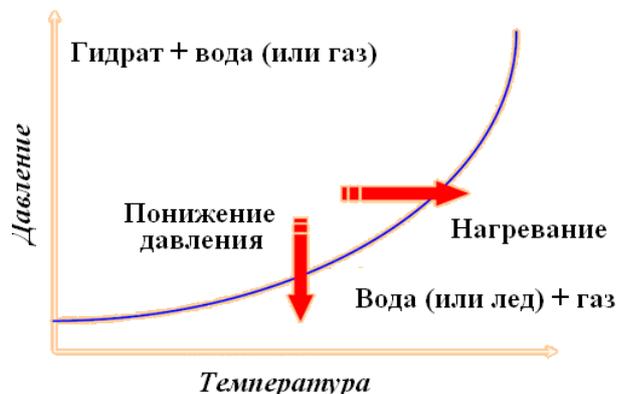


Рис. 8. Равновесная кривая гидратообразования

В результате, во-первых, мы можем потерять столь ценный углеводородный природный ресурс, а во-вторых, при разложении (при повышении температуры окружающей среды даже на несколько градусов) аквальных газогидратов выделяемый метан попадет в атмосферу Земли, где его концентрация удвоится и существенно усилит парниковый эффект [3; 4].

Кроме этого, необходимо заметить, что гигантские воронки (фото 1) в Ямало-Ненецком автономном округе в 2012 и 2013 гг. образовались из-за выброса газогидратов, вызванного прогревом земной поверхности⁶.



Фото 1. Газогидратные воронки в литосфере⁷

Освоение (разработка) выявленных к настоящему времени значительных объемов природных газогидратов (прежде всего – аквальных залежей), содержащих около $15\,000 \cdot 10^{12}$ м³ СН₄, сдерживается их довольно неустойчивым состоянием, обуславливающим возможное быстротечное (взрывное) разрушение их массивов (при этом в ходе подобного саморазрушения газогидратов объем газа увеличится в 160–180 раз),

⁶ Воронки на Ямале образовались из-за выброса газогидратов, вызванного прогревом земли [Электронный ресурс]. URL: <https://news.mail.ru/society/20326638>.

⁷ Там же.

что существенно осложняет и даже препятствует применению известных промышленных технологий их разработки (рис. 9).

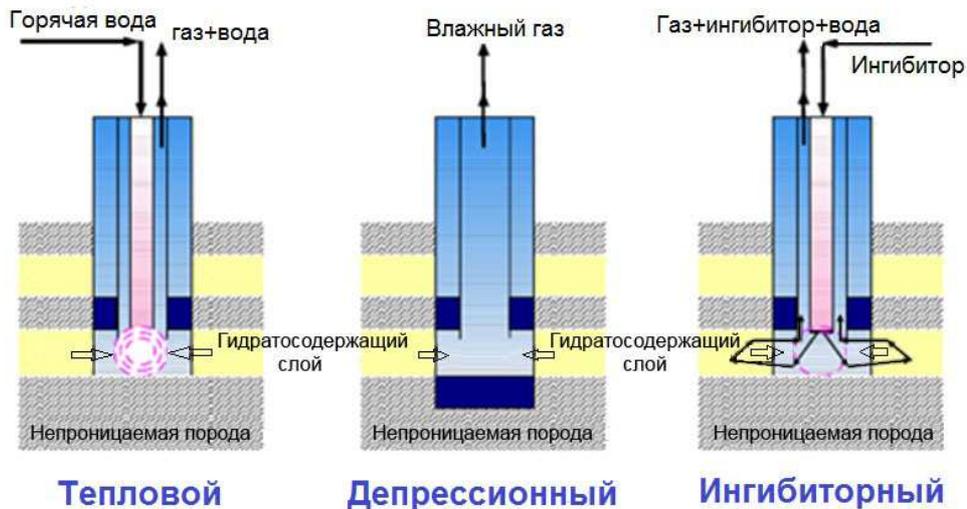


Рис. 9. Основные известные методы добычи газа из газовых гидратов

При этом себестоимость добычи газа из газогидратных залежей зависит от ряда факторов⁸: от геологических условий и применяемой технологии. Необходимо отметить, что ограниченное число как реализованных проектов добычи метана из газогидратных залежей, так и экономических расчетов подобных проектов затрудняет обоснованную оценку их средней себестоимости.

Так, проделанные в 2008 г. оценки добычи метана из газогидратной залежи Маллик в канадской Арктике показали, что совокупные капитальные и операционные издержки подобной разработки варьируются в пределах 195–230 долл./тыс. м³ для газогидратов, расположенных над свободным газом, и в пределах 250–365 долл./тыс. м³ – для газогидратов, расположенных над морским дном⁹. Особо была отмечена необходимость наличия соответствующей инфраструктуры для транспортировки добытого газа.

Японские разработчики оценивают себестоимость добычи метана из поддонных газогидратов по их проектам на уровне 540 долл./тыс. м³, в то время как по оценкам ИНЭИ РАН и Аналитического центра¹⁰ данная технология становится конкурентоспособной только при затратах на добычу метана ниже 390 долл./тыс. м³. По расчетам МЭА, оценочные издержки промышленной разработки месторождений газогидратов могут составить 175–350 долл./тыс. м³, что тем не менее делает их наиболее дорогостоящим (рис. 10) из известных способов добычи природного газа.

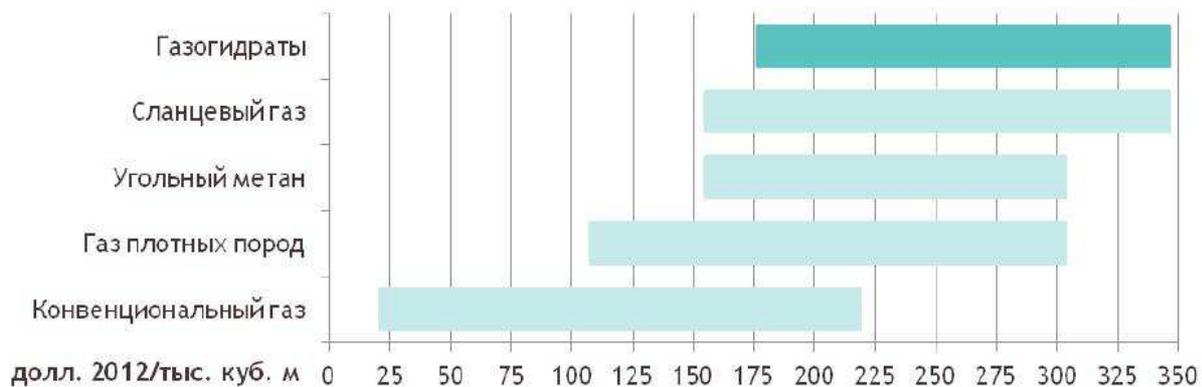


Рис. 10. Сравнительные издержки промышленной добычи природного газа¹¹

⁸ Стоимость разработки месторождений газогидратов [Электронный ресурс]. URL: http://www.benzol.ru/news/?cat_id=12&id=250519.

⁹ Там же.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же.

Нанотехнологии в освоении газогидратных ресурсов

В настоящее время снижение себестоимости продукции возможно прежде всего на основе использования достижений в области нанотехнологий (рис. 11).

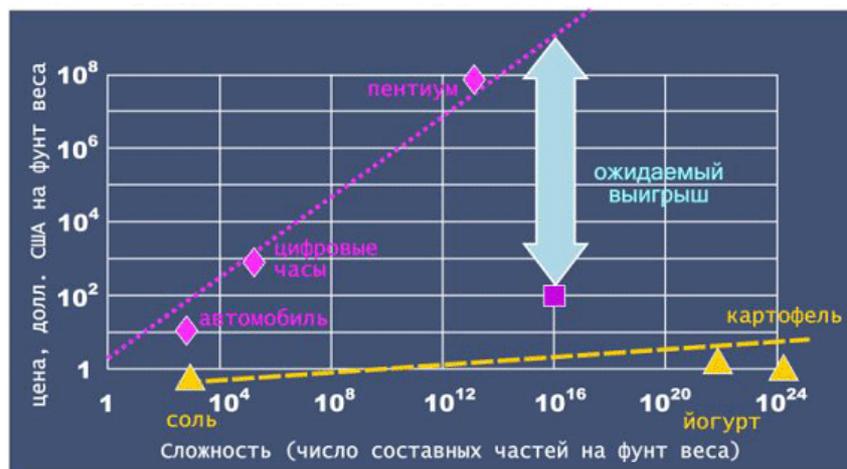


Рис. 11. Прогнозируемое удешевление продукции при переходе к нанотехнологиям (сверху вниз) и методам молекулярной и атомной самосборки (снизу вверх)¹²

Экспериментально было установлено, что основным структурным элементом газовых гидратов являются элементы, обладающие наноразмерностью и представляющие собой кристаллические ячейки, состоящие из молекул воды, внутри которых и размещены молекулы газа.

Структура гидратов подобна структуре льда, но отличается от последней тем, что молекулы газа расположены внутри кристаллических решеток, а не между ними.

Очевидно, что для разрушения подобной газогидратной ячейки более эффективным является использование различных наночастиц, соразмеримых с ячейкой.

Необходимо отметить, что длины связей в кристаллических решетках газогидратов и углы между ними практически одинаковы и равны 2,76 Å и 109,5°.

В соответствии с этой идеологией (выработанной автором) первоначально предполагалось подавать и использовать наночастицы практически любой формы, главным фактором являлась бы их масштабная соразмерность с разрушаемыми ячейками клатратов – газовых гидратов [5].

В дальнейшем была установлена явно выраженная зависимость эффективности разрушения газогидратов от формы наночастиц [6]: в частности, от наличия у сферических наночастиц различных шипов (фото 2), размещенных равномерно по всей их поверхности.

При перемещении сферической частицы (обладающей шипами) вдоль поверхности ячейки (клатрата) газогидратов происходит периодическое поднятие и опускание острого шипа, что приводит к разрушению кристаллической ячейки и высвобождению молекулы метана.



Фото 2. Вариант шипа наночастицы

Для эффективного обеспечения процесса разрушения ячейки клатрата, с включенной в нее молекулой метана, важными также представляются оптимальные параметры (их длина, расстояние между ними и др.) и форма (прямолинейная, изогнутая, утолщенная и т.д.) шипов сферической наночастицы.

¹² Нанотехнологии в России и мире [Электронный ресурс]. URL: <http://www.metodolog.ru/00318/00318.html>.

Такие наноструктуры, которые выглядят как природные биологические объекты – морские ежи (рис. 12), довольно легко формируются электрохимическим методом. Основным материалом для их строительства является полистирол. Микросфера полистирола представляет собой основу, на которой оксид цинка образует трехмерную поверхность. В результате получаются полые, сферической формы наноструктуры, с торчащими во все стороны шипами. В настоящее время 10 кг подобных наночастиц продается за 50 \$ США.



Рис. 12. Наноеж

В ходе проведенных нами исследований было установлено несколько довольно существенных аспектов, определяющих эффективность промышленного применения подобных нанотехнологий при разработке активных залежей газогидратов.

Во-первых, полученная в составе гидродинамической струи потенциальная энергия рабочего инструмента – наночастицы – обеспечивает ее перемещение по поверхности газогидратов только на весьма короткое расстояние, т. к. зачастую наблюдается ее рикошет (с потерей потенциальной энергией разрушения клатратных связей и изменением траектории перемещения) от поверхности газогидратной залежи. И, следовательно, практически каждая из них осуществляет разрушение довольно небольшого количества ячеек – клатратов (причем в несколько хаотической последовательности).

Поэтому, кроме шарообразных наночастиц, в качестве рабочего инструмента, разрушающего наногидратные залежи, более целесообразно применять различные молекулярные шестерни (рис. 13) и соединенные осью колеса. Модели подобных наноустройств были предложены К. Е. Drexler и R. Merkle из IMM (Institute for Molecular Manufacturing, Palo Alto).

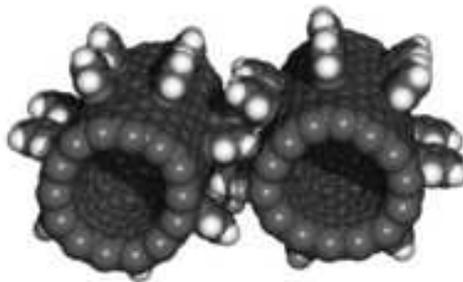


Рис. 13. Молекулярные шестерни

Валами шестеренок в подобной "коробке передач" являются углеродные нанотрубки, а зубцами служат молекулы бензола (рис. 14). При этом характерные частоты вращения шестеренок составляют несколько десятков гигагерц.



Рис. 14. Ось наноколес

Механизм образования подобных наноколес уже детально обоснован (рис. 15). Так, группой исследователей под руководством А. Мюллера (Achim Müller) из Университета Билефельд (Германия) было обнаружено, что смешение молибдата натрия, воды и восстановителя при низком значении pH приводит к самопроизвольному образованию бубликоподобных наноколес, состоящих из оксида молибдена. Диаметр формирующихся молибденсодержащих колес составляет около 4 нм.

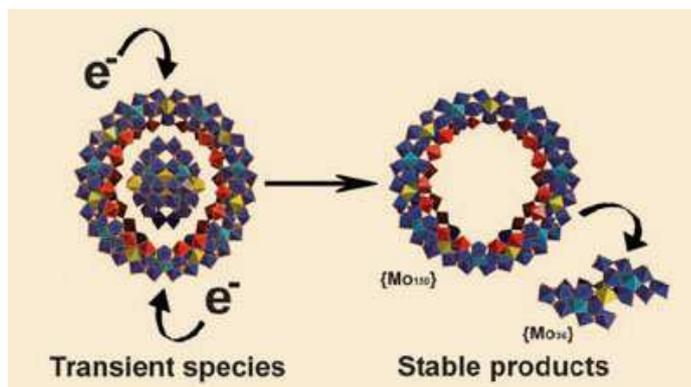


Рис. 15. Схема авторепликации наноколес

Необходимо также отметить, что 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 нанороботами¹³.

Нанороботы (в англоязычной литературе также используются термины "наноботы", "наноиды", "наниты") – это наномашины, созданные из различных наноматериалов и размером сопоставимые с молекулой¹⁴. Они должны обладать функциями движения, обработки и передачи информации, а также исполнения специальных программ. При этом размеры нанороботов не превышают нескольких нанометров.

Согласно современным теориям нанороботы должны уметь осуществлять двустороннюю коммуникацию¹⁵: реагировать на различные сигналы и быть в состоянии подзаряжаться или перепрограммироваться извне (посредством звуковых или электрических колебаний).

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

В настоящее время существуют различные подходы к разработке нанороботов¹⁶: одним из них является создание самоходных микро- и наноразмерных актюаторов (наномоторов). Наномотор представляет собой молекулярное устройство, способное преобразовывать различные виды энергии в движение. В типичном случае он может создавать силу порядка одного пиконьютона.

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

Так, в Калифорнийском университете были проведены лабораторные эксперименты по перемещению нанотрубок посредством диэлектрофореза в водных растворах (рис. 16). При этом промежуток между электродами-нанотрубками составлял 10 нм, а подаваемое на них напряжение – 1 В. В результате на концах таких электродов образовывалось довольно сильное неоднородное электростатическое поле, притягивающее подобные частицы.

В результате нанотрубки-электроды образуют статор, а наночастицы в центре – ротор. Если на электроды подавать переменное напряжение, то наночастица будет вращаться (причем ее положение напрямую зависит от величины напряжения, подводимого к электродам).

Кроме этого, М. Р. Hughes из School of Engineering, University of Surrey предложил модель асинхронного электродинамического наномотора, который обладает вращающим моментом благодаря вращающемуся электромагнитному полю.

¹³ Нанотехнологии в нефтяной промышленности. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.netrus.com/newtch/22-newtch/646-nanoychvneftprom.html>.

¹⁴ Лучшие разработки нанотехнологий 2011 [Электронный ресурс]. URL: <http://nanodigest.ru/content/view/975/1>.

¹⁵ Там же.

¹⁶ Наномотор [Электронный ресурс]. URL: <http://4108.ru/u/nanomotor>.

Подобное взаимодействие "вращающееся поле – электрический диполь (ротор)" значительно стабилизирует положение ротора. Электрическое поле генерируется благодаря прямоугольным импульсам, посылаемым на статор, что дает возможность прямого компьютерного управления таким наномотором. Также возможно прецизионное управление и частотой вращения такого ротора.

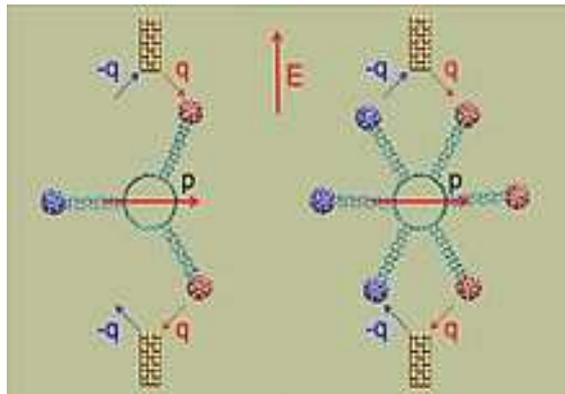


Рис. 16. Вращение молекулярного мотора электромагнитным полем

Разработанный наномотор состоит из ротора длиной 1 мкм и диаметром 100 нм. При этом такой наномотор развивает момент усилия в 10^{-15} Н/м.

Выводы

С учетом экспоненциального роста энергопотребления в мире человечеству необходимы новые источники энергии. Установлено, что в XXI в. основные углеводородные перспективы России оказались связаны с освоением шельфа ее арктических морей, где сосредоточено до 80 % всех потенциальных углеводородных ресурсов (начальные извлекаемые запасы которых в этом регионе составляют величину 62 млрд т.у.т). Среди этих ресурсов весьма важными являются газовые гидраты. Однако известные к настоящему времени технологии (вследствие довольно неустойчивого состояния газовых гидратов, обуславливающего возможное быстротечное (взрывное) разрушение их массивов) не позволяют обеспечить безопасное промышленное извлечение метана из аквальных газогидратных залежей. Поэтому для эффективного и безопасного разрушения газогидратных ячеек было предложено использовать различные наночастицы (подаваемые в составе гидродинамической струи), соразмерные с ячейкой. Представленные нанотехнологии (основанные на наночастицах или наноактюаторах-наномоторах) обеспечивают эффективную и последовательную проработку всей поверхности аквальной залежи газогидратов, с необходимой скоростью их разрушения и получения запланированных объемов метана.

Библиографический список

1. Максимов В. М., Тупысев М. К., Пронюшкина С. М. Некоторые проблемы экологической и промышленной безопасности природно-техногенных морских объектов при освоении шельфа Арктики // Арктика: экология и экономика. 2014. № 4 (16). С. 60–67.
2. Матвеева Т. В., Черкашён Г. А. Газогидраты: проблемы изучения и освоения [Электронный ресурс]. URL: [http:// chrome-extension://oemmnscbldboiebfnladdacbfmadadm/http://www.rosnedra.gov.ru/data/ Files/File/2569.pdf](http://chrome-extension://oemmnscbldboiebfnladdacbfmadadm/http://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/2569.pdf).
3. Воробьев А. Е., Пучков Л. А. Человек и биосфера: глобальное изменение климата : учебник. Ч. I. М. : Изд-во РУДН, 2006. 442 с.
4. Воробьев А. Е., Пучков Л. А. Человек и биосфера: глобальное изменение климата : учебник. Ч. II. М. : Изд-во РУДН, 2006. 468 с.
5. Воробьев А. Е. Основные принципы эффективного применения промышленных нанотехнологий при добыче аквальных газогидратов // Наноинженерия. 2014. № 12.
6. Воробьев А. Е. Основы механизма эффективного применения промышленных нанотехнологий при добыче аквальных газогидратов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. 2014. № 6 (28). С. 102–108.

References

1. Maksimov V. M., Tupysev M. K., Pronyushkina S. M. Nekotorye problemy ekologicheskoy i promyishlennoy bezopasnosti prirodno-tehnogennyh morskikh ob'ektov pri osvoenii shelfa Arktiki [Some problems of environmental and industrial safety of natural and man-made offshore facilities during the development of the Arctic shelf] // Arktika: ekologiya i ekonomika. 2014. N 4 (16). P. 60–67.

2. Matveeva T. V., Cherkashèv G. A. Gazogidraty: problemy izucheniya i osvoeniya [Gas hydrates: problems of learning and development] [Elektronnyi resurs]. URL: [http:// chrome-extension://oemmnndcbldboiebfnladdacbfmadadm/http://www.rosnedra.gov.ru/data/ Files/File/2569.pdf](http://chrome-extension://oemmnndcbldboiebfnladdacbfmadadm/http://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/2569.pdf).
3. Vorobev A. E., Puchkov L. A. Chelovek i biosfera: globalnoe izmenenie klimata [Man and the biosphere: global climate change] : uchebnik. Ch. I. M. : Izd-vo RUDN, 2006. 442 p.
4. Vorobev A. E., Puchkov L. A. Chelovek i biosfera: globalnoe izmenenie klimata [Man and the biosphere: global climate change] : uchebnik. Ch. II. M. : Izd-vo RUDN, 2006. 468 p.
5. Vorobev A. E. Osnovnye printsipy effektivnogo primeneniya promyshlennykh nanotekhnologiy pri dobyche akvalnykh gazogidratov [Core principles for effective industrial application of nanotechnology in the extraction of gas hydrates aquatic] // Nanoinzheneriya. 2014. N 12.
6. Vorobev A. E. Osnovy mehanizma effektivnogo primeneniya promyshlennykh nanotekhnologiy pri dobyche akvalnykh gazogidratov [Basic mechanisms for effective industrial application of nanotechnology in the extraction of gas hydrates] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S. O. Makarova. 2014. N 6 (28). P. 102–108.

Сведения об авторе

Воробьев Александр Егорович – Российский университет дружбы народов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой; e-mail: fogel_al@mail.ru

Vorob'yev A. E. – Peoples' Friendship University of Russia, Dr of Tech. Sci., Professor, Head of Department; e-mail: fogel_al@mail.ru