

Е.С. Сай, К.А. Ганушевич

## УТИЛИЗАЦИЯ ШАХТНОГО МЕТАНА И ЕГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ В ГАЗОГИДРАТНОМ СОСТОЯНИИ

*Обоснована необходимость решения проблемы, связанной со значительными выбросами газа дегазационных скважин в окружающую среду. Авторами статьи предлагается новое альтернативное технологическое решение, включающее перевод шахтного метана в газогидратное состояние и дальнейшее транспортирование газа в твердом состоянии. Выяснен механизм процесса гидратообразования, проанализирована возможность получения газогидратов из газовых смесей дегазационных скважин. Обоснованы преимущества транспортирования газа в форме газовых гидратов.*

---

### УТИЛІЗАЦІЯ ШАХТНОГО МЕТАНУ ТА ЙОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ У ГАЗОГІДРАТНОМУ СТАНІ

*Обґрунтовано необхідність вирішення проблеми, пов'язаної зі значними викидами газу дегазацийних свердловин у навколишнє середовище. Авторами статті пропонується нове альтернативне технологічне рішення, що включає переведення шахтного метану в газогідратний стан і подальше транспортування газу у твердому стані. Вияснено механізм процесу гідратоутворення, проаналізована можливість отримання газогідратів з газових сумішей дегазацийних свердловин. Обґрунтовано переваги транспортування газу у формі газових гідратів.*

---

### UTILIZATION OF MINE METHANE AND THEIR TRANSPORTATION IN GAS HYDRATES STATE

*The necessity to solve the problem related to significant emissions of degassing wells gas into the environment is substantiated. The authors of the paper propose a new alternative technological solution that includes conversion of mine methane into gas hydrate state and further transportation of gas in solid state. The mechanism of gas hydrate formation process is clarified and the possibility of gas hydrates creation from gaseous mixtures of various compositions is analyzed. Substantiation is given to gas transportation in a state of gas hydrates.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основными проблемами, сопутствующими разработке угольных месторождений, является взрывоопасность метана, содержащегося в угольных пластах, а также нерациональное его использование вследствие выбросов газа в ок-

ружающую природную среду. Газы с высоким содержанием метана (80 – 95%) присутствуют в угольных пластах и выделяются в виде шахтного метана в процессе разработки месторождения. Угольные шахты являются крупным источником выбросов метана – одного из парниковых газов, потенциал глобального потепления которого в

20 раз превышает соответствующий потенциал диоксида углерода [1].

На сегодняшний день в атмосферу выбрасывается 95% метана, выделившегося при эксплуатации шахты. Добыча и использование шахтного метана может существенно сократить объемы его выделения в атмосферу угольными предприятиями. Как самостоятельный энергетический ресурс метан угольных пластов начал рассматриваться энергетиками с 1970-х годов. В качестве попутного полезного ископаемого шахтный метан используется уже в течение более 40 лет, в основном для удовлетворения энергетических потребностей шахт.

Предотвращение опасных скоплений метана в выработках высокометаносных пластов угольных шахт осуществляется путем искусственной дегазации источников метана, то есть организацией изолированного от горных выработок вывода на поверхность высококонцентрированных метановоздушных смесей. Наиболее эффективную обработку газоносных пластов при выделении шахтного метана обеспечивает способ комплексной дегазации при помощи вертикальных дегазационных скважин [2]. Дегазация угольных полей имеет три аспекта: добыча метана как энергоносителя, обеспечение безопасности ведения горных работ, снижение выбросов метана в атмосферу.

Вопрос переработки метана угольных месторождений на сегодняшний день – один из ключевых. Множество исследований ведется для обеспечения безопасности эксплуатации шахт, комплексного освоения минеральных ресурсов и охраны окружающей среды. Одним из наиболее перспективных направлений снижения негативного воздействия, оказываемого выбросами газа угольных пластов в атмосферу, является получение газовых гидратов из шахтного метана дегазационных скважин. Разработка необходимой технологии значительно улучшит не только экологическую, но и экономическую ситуацию в Украине.

## МЕТАН УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Угольный газ приобретает все большую значимость в мире не только как дополнительный источник минерально-сырьевой базы углеводородов, но и как фактор снижения рисков газовых выбросов в шахтах и связанных с ними аварийных ситуаций. Эта проблема весьма важна и для Украины, ей посвящен ряд научных публикаций и научно-исследовательских работ [3 – 5].

По предварительным оценкам, мировые ресурсы метана оцениваются в 260 трлн м<sup>3</sup>. Наиболее значительные его запасы сосредоточены в США, Китае, России, Австралии, ЮАР, Индии, Польше, Германии и Украине. Из-за отсутствия единых методик определения запасов шахтного метана данные о его количестве несколько отличаются. Их величина в основных угледобывающих странах мира, согласно одному из источников, приведена в табл. 1 [6].

Как видим, Украина имеет существенные запасы метана, находящегося в угольных пластах, пропластках и окружающих горных породах, который может стать ценным энергоресурсом и быть использован в качестве автомобильного топлива, а также в местной инфраструктуре для отопления и выработки электроэнергии. Ресурсы метана угольных пластов, или шахтного метана, в Украине (в основном в Донбассе) составляют, по минимальным подсчетам, 1,7 – 2 трлн м<sup>3</sup>. Шахтами Донбасса за год выделяется около 1,5 млрд м<sup>3</sup> метана, Львовско-Волыньским угольным бассейном – около 60 млн м<sup>3</sup>. Доля используемого как топливо газа составляет только 8%. Остальной газ просто выбрасывается в атмосферу и загрязняет окружающую среду.

Украина – один из крупнейших источников выбросов метана в Европе. Метан в качестве топлива используют лишь на нескольких украинских шахтах. По количеству выбросов угольного метана в атмосферу Украина занимает четвертое место в мире, что наглядно демонстрирует диаграмма, приведенная на рис. 1. При среднем содержании метана в углях 15 м<sup>3</sup>/т [7] и сложив-

шемся в стране среднегодовом уровне добычи угля 88,2 млн т, что составляет 1,12% от мировой добычи [6], количество выделяющегося при извлечении и транспорти-

ровании метана (около 2 млрд м<sup>3</sup>) по вкладу в парниковый эффект эквивалентно сжиганию 9 млрд м<sup>3</sup> природного газа.

ЗАПАСЫ МЕТАНА УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ В УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ СТРАНАХ МИРА

Таблица 1

Страна	Запасы метана, трлн м <sup>3</sup>
США	60
Россия	58
Китай	28
Австралия	22
Индия	18
Германия	16
ЮАР	13
Украина	8
Казахстан	8
Польша	3
Прочие	26
Итого в мире	260

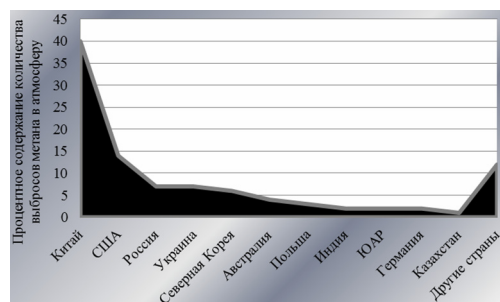


Рис. 1. Структура выбросов шахтного метана по основным угледобывающим странам мира, %: Китай – 40; США – 14; Россия – 7; Украина – 7; Северная Корея – 6; Австралия – 4; Польша – 3; Индия – 2; ЮАР – 2; Германия – 2; Казахстан – 1; другие страны – 12

Принимая во внимание колоссальные объемы газа, сосредоточенного в угольных пластах, необходимой является его утилизация, которая несет в себе следующие положительные аспекты:

– альтернативный энергетический ресурс, который помог бы снизить зависимость Украины от импортируемого топли-

ва из стран СНГ;

– возможность использования шахтного метана для генерации электроэнергии;

– возможность использования шахтного метана для закачки его в газопровод;

– снижение экологической опасности за счет сокращения выбросов парникового газа метана украинскими шахтами в атмосферу;

– повышение безопасности и производительности труда шахтеров.

В составе газа, поступающего на поверхность из дегазационных скважин, содержание метана колеблется от 2 до 95%. Дебиты скважин также изменяются в широком диапазоне. В связи с этим возникает задача найти такой способ утилизации шахтного газа, для которого химический состав не был бы жестким условием. На наш взгляд, таким способом является перевод газовой смеси дегазационной скважины в твердое состояние, т.е. получение газовых гидратов. Газогидратная технология хранения и транспортирования природного газа является реальной перспективой будущего, поскольку в 1 м<sup>3</sup> газового

гидрата содержится до 200 м<sup>3</sup> метана, которому не характерно самовозгорание, присущее метану в свободном или сжиженном состоянии.

Разработка метода получения газогидратов из шахтной метановоздушной смеси и технология его транспортирования весьма актуальны в настоящее время и экономически целесообразны при разработке угольных месторождений [8]. Комплексный подход позволит объединить технологию добычи угля и метана в единую систему, повысит рентабельность угольных шахт, безопасность труда и обеспечит энергетическую независимость нашего государства.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ

Установлено, что способностью к гидратообразованию обладают все гидрофобные газы и легколетучие органические жидкости, такие как  $Ar$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ , изо- $C_4H_{10}$ ,  $Cl_2$ ,  $CS_2$ , галогенопроизводные углеводородов  $C_1 - C_4$ , а также некоторые гидрофильные соединения ( $CO_2$ ,  $SO_2$ , окись этилена, тетрагидрофуран (ТГФ), ацетон), взаимодействие которых с водой достаточно слабое и не может препятствовать клатратообразованию [9].

Процесс образования газовых гидратов, как и любой другой процесс, состоит из следующих стадий:

1 – образование зародышей кристаллизации;

2 – сорбционный рост кристаллогидрата вокруг зародышей.

Образование зародышей кристаллизации обычно происходит на поверхности контакта «газ-вода». Рост кристаллогидрата при наличии зародышей кристаллизации может происходить как на свободной поверхности контакта «газ-вода», так и в объеме газа или воды. Поверхностно-контактный рост газогидрата характеризуется относительно высокой скоростью, величина которой определяется кинетически-

ми параметрами и интенсивностью отвода тепла, которое выделяется при кристаллизации. Процесс зарождения центров кристаллизации может начаться лишь при условии насыщения газа парами воды. Зародыши кристаллизации газового гидрата легче образуются на свободной поверхности контакта «газ-вода», поскольку на этой поверхности находится переходный слой, в котором в перенасыщенном состоянии находится как вода, так и газ. При создании соответствующих термобарических условий именно в этом промежуточном слое формируются центры кристаллизации. Формирование центров кристаллизации на поверхности контакта «газ-вода» начинается с объединения отдельных кластеров молекул воды, число и величина которых в воде зависят от температуры.

Скорость образования центров кристаллизации газового гидрата зависит от давления и температуры среды, в которой происходит процесс гидратообразования. С увеличением давления скорость образования зародышей кристаллизации растет. При повышении степени переохлаждения скорость образования зародышей резко возрастает, а при достижении определенного значения (при заданном давлении) плавно снижается.

После возникновения центров кристаллизации газогидрата наступает следующая стадия гидратообразования – массовая кристаллизация, под которой понимают одновременный рост большого числа образовавшихся центров кристаллизации.





Рис. 2. Газовые гидраты, полученные в лабораторных условиях в лаборатории НГУ

В лаборатории инновационных технологий НГУ в ходе проведения экспериментальных исследований были созданы исходные термобарические параметры процесса гидратообразования и получены образцы газовых гидратов искусственным путем (рис. 2).

Эксперименты проводились при различном наборе параметров – диапазон давлений от 0,6 до 9,5 МПа и диапазон температур от  $-5$  до  $+11$  °С. В результате были получены графические зависимости параметров процесса гидратообразования (рис. 3).

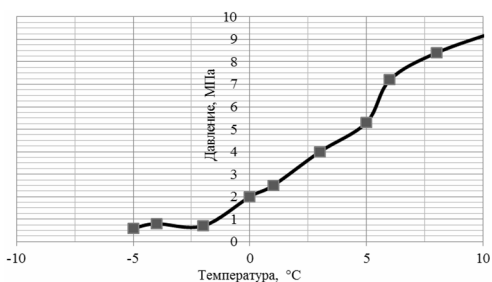


Рис. 3. Диаграмма фазовых переходов искусственных газогидратов, полученных экспериментальным путем

Что касается формы кристаллогидратов, то они могут быть очень разнообразны. Это зависит, в первую очередь, от формы молекул газа, его состава и фазового состояния, а также от термодинамических параметров процесса гидратообразования. Установлено,

что чем меньше молекулярная масса газогидратообразователя и чем ближе формы молекул, которые вступают в реакцию, тем образующиеся кристаллы газового гидрата есть прямолинейнее. Кристаллы гидрата метана, как правило, прямолинейной игольчатой формы, хотя метан может образовывать гидратные пленочные наросты типа сферолитов, а также четкие лучи – спирали. Для этана же наиболее характерны извилистые нитевидные кристаллы. Несмотря на одинаковое молекулярное соотношение газа и воды у метановых и этановых гидратов, форма и размер молекул газогидратообразователя несколько различно деформируют элементарную ячейку гидрата, что сказывается и на внешней форме образующегося гидрата при его строительстве из деформированных решеток. Гидрат пропана характеризуется большим размытием форм [10].

Природные газы, состоящие из смесей различных компонентов, образуют смешанные газовые гидраты. При этом одновременно образуются кристаллы, характерные как для метана, этана, так и для других газов.

## ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ГАЗА В ГАЗОГИДРАТНОМ СОСТОЯНИИ

При рассмотрении способа транспортирования природного газа на первом месте должен стоять фактор безопасности. В настоящее время учеными рассматриваются два варианта перевозки газа: в виде газовых гидратов и в сжиженном виде. Таблица параметров применения этих двух способов на практике представлена ниже (табл. 2), из которой очевидно, что газовые гидраты могут транспортироваться при более высокой температуре, чем сжиженный газ. Это позволяет говорить об экономичности такого способа транспортирования. Также можно выделить и следующие преимущества: капитальные и эксплуатационные затраты, энергоемкость, выбросы парниковых газов при формировании и пере-

возке и, самое главное, безопасность транспортирования газа, т.к. возможность внезапного взрыва сводится к нулю.

Наибольшее внимание исследователи уделяют метановым гидратам, поскольку

именно метан является чистым источником энергии. Экономическая эффективность транспортирования обеспечивается высокой концентрацией газа в гидрате (до  $200 \text{ м}^3$ ).

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ И СЖИЖЕННОГО ГАЗА

Таблица 2

Характеристика	Газовые гидраты	Сжиженный газ
Состояние	твердое	жидкое
Содержание газа в $1 \text{ м}^3$	до $200 \text{ м}^3$ газа (в среднем $165 \text{ м}^3$ газа + $0,8 \text{ м}^3$ )	$600 \text{ м}^3$ газа
Температура, °С	$-20 \text{ °С}$	$-162 \text{ °С}$
Удельный вес	0,85–0,95	0,42–0,47

Транспортирование и использование газовых гидратов включает три этапа: создание гидрата, собственно транспортировку, освобождение газа при его разложении с последующим использованием в качестве топлива.

Основное условие эффективной перевозки газогидратов – это поддержание минусовой температуры (от  $-5$  до  $-20 \text{ °С}$ ) для обеспечения стабильности их клатратной структуры при атмосферном давлении. Немаловажное значение при этом имеет эффект самоконсервации, при котором поверхность гидрата покрывается пленкой, не позволяющей выходить газу. Самоконсервация газовых гидратов известна как очень медленное разложение гидрата, когда внешнее давление опускается ниже равновесного значения для системы «газ-лед-газовый гидрат» при температуре ниже нуля градусов (как следствие – формирование ледяной корки на поверхности гидрата). Это свойство газогидратов является критическим и играет существенную роль при обосновании параметров транспортирования газовых гидратов в условиях атмосферного давления и температур ниже нуля градусов [11, 12].

Поскольку очевидно, что эффект самоконсервации имеет место только при температуре ниже нуля градусов, общепринятым стало мнение, что накопление кристаллов льда на поверхности гидрата (при сбросе

давления и, соответственно, постепенном таянии гидрата) и есть причина этого явления. Исследования показали, что только наличие пленки на поверхности гидрата является недостаточным условием. Также нужно учитывать роль таких факторов, как соотношение между давлением и температурой, микроструктура льда, скорость образования кристаллов льда, состав газа. Комбинация этих факторов приводит к эффекту, при котором образование очень тонкой пленки создает достаточный диффузионный барьер для высвобождающихся молекул газа.

Вероятно, что высвобожденные молекулы газа растворяются в пограничном слое между льдом и клатратом, поддерживая требуемую химическую активность для стабильности гидрата, таким образом, ледяной корке не требуется высокого давления. Следовательно, самоконсервация должна рассматриваться как сложное явление, в котором часть клатрата, подверженная влиянию внешних факторов, «жертвует», чтобы сформировать защитную ледяную корку.

Поскольку толщина ледяного слоя не зависит от размера частиц, можно улучшить эффективность самоконсервации путем изменения отношения поверхность-объем: множество исследований показали, что частицы больших размеров с маленькой остаточной пористостью увеличивают степень самоконсервации по сравнению с малень-

кими частицами, дестабилизированными при таком же давлении и температуре [13]. К тому же, частицы больших размеров приводят к самоконсервации при менее подходящих условиях. При благоприятных условиях с хорошо контролируемым размером частиц только крошечная порция гидрата должна быть разрушена, чтобы образовать ледяную корку, которая ограждает нестабильную структуру от дальнейшего разложения. В таком метастабильном состоянии гидрат может удерживать большой объем газа очень длительное время (несколько месяцев) при условиях, далеких от равновесных для образования газогидратов: температуре ниже точки таяния льда и атмосферном давлении.

Очевидно, что для транспортирования газа в виде газовых гидратов нужны специальные герметичные сосуды. Во время

транспортирования газогидратов необходимо контролировать давление и температуру внутри сосуда, чтобы не позволить растаять ледяной корке на поверхности гидратов. Как уже было отмечено, перевозку газовых гидратов можно производить при атмосферном давлении и температуре ниже нуля (от  $-5$  до  $-20$  °С). Следовательно, нужно применять активное охлаждение пространства, в котором находятся газогидраты для поддержания нужной температуры [14, 15].

#### ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СПОСОБ СОЗДАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

Для промышленного производства газовых гидратов из газа дегазационных скважин предлагается создать установку по получению газогидратов на автомобиле рефрижераторного типа (рис. 4).



Рис. 4. Мобильная установка для получения газовых гидратов из газовых смесей дегазационных скважин

Конструктивно камера разделена на две секции: в первой секции, в зоне реактора, происходит формирование газового гидрата и поддерживается температура  $+1...+3$  °С, давление при этом составляет  $5-6$  МПа. Вторая секция камеры предназначена для хранения (консервации) газового гидрата при атмосферном давлении и температуре  $-20$  °С.

На входе в реактор монтируется компрессор для закачки газовой смеси из скважины в газоаккумулятор, на входе которого

должно достигаться давление до  $6$  МПа (с возможностью его регулирования). Газоаккумулятор имеет объем не менее  $200$  л и выдерживает давление до  $10$  МПа. Для этого можно соединить  $4$  и более автомобильных метановых баллонов.

Насос для подачи воды в реактор развивает давление до  $10$  МПа и имеет регулируемую производительность до двух литров в минуту. Форсунки для распыления воды выдерживают давление до  $10$  МПа и распыляют воду до мелкодисперсного состояния.

Для этой цели рассматриваются дизельные форсунки.

Реактор является разъемной конструкцией, выдерживающей давление до 6 МПа. В реактор поступает метан из газоаккумулятора и вода через форсунки. Конструкция реактора выполнена в виде циклона, в котором газовый поток закручивается и смешивается с тонко распыленной водой, образуя водно-газовую мелкодисперсную смесь. Расход воды регулируется таким образом, чтобы не образовывалось излишка воды. Образующийся газогидрат собирается в нижней части реактора и далее с помощью шнека подается в хранилище с поддерживаемой температурой – 20 °С.

Излишек газа, не прореагировавший с водой, возвращается к компрессору для повторного ввода в реактор. При этом реактор помещается в термокамеру, поддерживающую температуру +1...+3 °С.

Данное технологическое решение по получению искусственных газовых гидратов из газовых смесей различного состава возможно применять на дегазационных скважинах угольных шахт.

## ВЫВОДЫ

1. Выяснено, что Украина имеет существенные ресурсы метана (8 трлн м<sup>3</sup>), находящегося в угольных пластах, который может быть использован в качестве альтернативного энергоресурса. Раскрыта значимость шахтного метана в качестве дополни-

тельного источника минерально-сырьевой базы углеводородов. Приведена количественная оценка запасов метана угольных пластов в ведущих угледобывающих странах мира.

2. Установлены положительные аспекты утилизации шахтного метана, которая позволит снизить экологическую опасность за счет снижения выбросов парникового газа в атмосферу, который, несомненно, является основным источником увеличения глобального потепления; повысить безопасность ведения горных работ; даст возможность использовать шахтный газ в качестве энергетического ресурса.

3. Предложен способ перевода газовых смесей дегазационных скважин в газогидратное состояние. Обоснованы преимущества получения газовых гидратов в условиях украинских шахт. Проведены аналитические исследования процесса гидратообразования, выяснен механизм роста кристаллогидратов в условиях их формирования из газа дегазационных скважин.

4. Обоснован способ перевозки и хранения газа в газогидратном состоянии, приведена сравнительная характеристика параметров способов транспортирования газа в виде газовых гидратов и сжиженного газа. Рассмотрен эффект самоконсервации газогидратов, который позволяет производить транспортирование газовых гидратов при атмосферном давлении в условиях отрицательных температур (–5...–20 °С).



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parry M.L. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change: impacts, adaptation and vulnerability / M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson. – Cambridge, United Kingdom and New

York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

2. Литвиненко А.С. Метан угольных месторождений как альтернативный источник топлива / А.С. Литвиненко, Л.Н. Таранюк // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2006. – № 1.

3. Конарев В.В. Метан угольных месторождений – пора заняться им всерьез / В.В. Конарев // Уголь Украины. – 2000. – № 2. – С. 3 – 7.



4. Булат А.Ф. Направления энерготехнологической переработки метана угольных месторождений / А.Ф. Булат, И.Ф. Чемерис // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр. // ИГТМ НАН Украины. – Д., 2005. – Вып. 32. – С. 67 – 74.
5. Извлечение шахтного метана и защита окружающей среды / С.В. Кузаря, И.Д. Дрозник, Ю.С. Кафтан [и др.] // Уголь Украины. – 2005. – № 6. – С. 13 – 15.
6. BP Statistical review of world energy, June 2013. – The Editor BP Statistical Review of World Energy BP p.l.c., 1 St James's Square. – London SW1Y 4PD, UK.
7. Энергетика: история, настоящее и будущее. От огня и воды к электричеству / [В.И. Бондаренко, Г.Б. Варламов, И.А. Вольчин и др.] // Энергетика: история, настоящее и будущее. От огня и воды к электричеству. – К.: ООО «Редакция «Энергетика: история, настоящее и будущее», 2011. – 264 с.
8. Ovchynnikov M. Methodology of gas hydrates formation from gaseous mixtures of various compositions / M. Ovchynnikov, K. Ganushevych, K. Sai // Balkema, CRC Press. – 2013. – Vol. 4. – P. 203 – 205.
9. Ярунин С.А. Технология извлечения метана из вентиляционных струй шахт / С.А. Ярунин, В.Н. Королева, Ю.Г. Анпилогов // ШАБ. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – № 6. – С. 88 – 89.
10. Макогон, Ю.Ф. Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование / Ю.Ф. Макогон. – М.: Недра, 1985. – 232 с.
11. Бондаренко В.И. К вопросу скважинной подземной разработки газовых гидратов / В.И. Бондаренко, К.А. Ганушевич, Е.С. Сай // Науковий вісник НГУ. – 2011. – № 1 (121). – С. 60 – 66.
12. Makogon Y.F. Additional source of energy of Ukraine / Y.F. Makogon // Oil and gas industry. – 2010. – № 3. – P. 47 – 51.
13. Zhong D.L. Natural gas hydrate and growth on suspended water droplet / [D.L. Zhong, D.P. Liu, Z.M. Wu [and others]] // Proceeding of the 6th International conference on gas hydrates (ICGH 2008). – Vancouver, British Columbia, Canada. – July 6-10. – 2008. – 11 p.
14. Welander P. Designing and optimizing gas/liquid reactions for: Environmental processes/chemical reactions/heat transfer / P. Welander, T.L. Vincent // Brochure from exhibition at the chem show. – New York. – NY, USA, 1999.
15. Brown T.D. Rapid gas hydrate formation processes: Will they work? / T.D. Brown, C.E. Taylor, M.P. Bernardo // Energies. – 2010. – Vol. 3. – P. 1154 – 1175.

## ОБ АВТОРАХ

Сай Екатерина Сергеевна – ассистент кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.

Ганушевич Константин Анатольевич – аспирант кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.

