

ГЕОТЕРМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ АКВАТОРИЙ

А.Д. Дучков, В.Е. Истомирин, Л.С. Соколова

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Формулируются основные положения геотермического метода определения гидратонасыщенности донных осадков. Лабораторные эксперименты, выполненные коллективом исследователей из ИНГТ СО РАН и ИНХ СО РАН, показали, что для выявления газогидратов в донных отложениях водоемов необходимо осуществить в одном пункте дна, как минимум, два измерения теплопроводности, используя цилиндрический зонд с разной мощностью нагревателя. Изменение мощности нагревателя позволяет регулировать состояние (стабильное и нестабильное) газогидратов. Маломощный зонд не приводит к распаду газогидратов и позволяет измерять истинную теплопроводность осадков. Увеличение мощности нагревателя вызывает разложение газогидратов вблизи зонда и приводит к резкому возрастанию эффективной теплопроводности. Сравнение значений истинной и эффективной теплопроводности позволяет однозначно судить о наличии или отсутствии газогидратов в образце. Предложена методика количественной интерпретации изменений температурного поля цилиндрического зонда, позволяющая достаточно точно определить массу разложившегося за определенное время газогидрата в слое вокруг зонда и примерно оценить его содержание в осадках. Для выполнения измерений теплопроводности в полевых условиях можно использовать погружные многоканальные термозонды, обычно применяемые при изучении теплового потока через дно акваторий. Важной задачей сейчас является проведение полевых экспериментов для наработки необходимого опыта применения геотермического метода.

Гидраты метана, моделирование гидратсодержащих образцов, измерение теплопроводности, истинная и эффективная теплопроводности.

A GEOTHERMAL METHOD FOR DETECTING GAS HYDRATES IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF WATER BASINS

A.D. Duchkov, V.E. Istomin, and L.S. Sokolova

We formulate the fundamentals of the geothermal method for determining the hydrate saturation of bottom sediments. According to laboratory experiments (A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, A.V. Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry), detecting gas hydrates in bottom sediments requires measurement of thermal conductivity at least twice at one bottom site, using a cylindrical probe with different heater power values. Changing the latter permits controlling gas hydrate stability and instability. A low-power probe does not destroy gas hydrates and permits measuring the true thermal conductivity of the sediments. Increasing heater power destroys gas hydrates near the probe and drastically increases effective thermal conductivity. Comparison between true and effective thermal conductivity clearly shows the presence of gas hydrate in the sample or their absence from it. A technique was proposed for the quantitative interpretation of changes in the temperature field of a cylindrical probe. It permits quite a precise determination of the mass of gas hydrate that decomposed in the layer surrounding the probe over a certain period. Also, it permits a rough estimation of the gas hydrate content in the sediments. Thermal conductivity can be measured in the field with submersible multichannel thermoprobes, which are commonly used to study the heat flow through the bottom of water basins. Now it is important to perform field experiments, so that we gain the necessary experience with the geothermal method.

Methane hydrates, modeling of hydrate-containing samples, measurement of the thermal conductivity of hydrate-containing samples, true and effective thermal conductivity

ВВЕДЕНИЕ

Гидраты метана широко распространены в природе, что и обуславливает интерес к ним как к перспективному источнику энергии. Необходимыми условиями образования и существования природных газогидратов является наличие требуемых для этого давления (P) и температуры (T), а также достаточное количество воды и свободного (либо растворенного в воде) газа. Такие условия реализуются в осадках морей на глубинах более 300—500 м [Истомирин, Якушев, 1992; Гинзбург, Соловьев, 1994; Соловьев, 2002]. Относительно недавно гидраты метана были обнаружены и в осадках пресноводного оз. Байкал

[Кузьмин и др., 2000; Клеркс и др., 2003; Дучков, 2003]. Скопления метангидратов в осадках водоемов аккумулируют метан из глубинных газофлюидных потоков и фактически являются возобновляемым природным ресурсом. Суммарные запасы метана в них могут, по некоторым оценкам, достигать 10^{13} — 10^{14} м³ [Соловьев, 2002].

Известные скопления газовых гидратов формируются в осадках либо непосредственно вблизи дна, либо значительно глубже. Такие глубоко залегающие скопления можно обнаружить только в процессе подводного бурения. В данном сообщении мы рассматриваем проблему поисков только придонных залежей, которые более доступны для изучения и в то же время содержат значительные запасы газа. К настоящему времени грунтовыми трубками найдены и исследованы сотни таких неглубоко залегающих скоплений гидратов метана в осадках окраинных морей и оз. Байкал. Однако, несмотря на это, строение газогидратных залежей изучено еще недостаточно. Установлено, что они формируются вокруг активных газовых источников и, скорее всего, имеют цилиндрическую форму диаметром в несколько сотен метров и мощность от нескольких до десятков метров [Соловьев, 2002]. Содержание газогидратов в пределах залежи может достигать 10—20 мас. % и более. Вокруг залежи может формироваться больший по размерам диффузионный ореол, в котором содержатся лишь рассеянные количества газогидратов порядка нескольких массовых процентов.

Актуальной задачей является разработка геофизических методов поисков и оконтуривания таких сравнительно небольших газогидратных тел, расположенных к тому же под мощным слоем воды. Проблема усложняется и недостаточной изученностью физических свойств гидратсодержащих осадков. Наибольшее внимание исследователей привлекают тепловые свойства, поскольку именно они определяют динамику температурного поля, контролирующего процессы формирования и распада газовых гидратов. В настоящем сообщении рассмотрена возможность использования измерений температуры (T) и теплопроводности (λ) донных осадков с целью определения их гидратонасыщенности.

Впервые на эту возможность обратил внимание В.А. Голубев [1998], основываясь на результатах своих исследований теплового потока оз. Байкал. Этот вывод подтвердили авторы вышедшей позднее работы [Кутас и др., 2005], в которой анализировались тепловые эффекты, выявленные при измерении *in situ* теплопроводности донных осадков Черного моря. В указанных работах теплопроводность измерялась методом цилиндрического (игольчатого) зонда постоянной мощности, описанного в [Von Herzen, Maxwell, 1959]. В теоретической работе [Гольмшток и др., 2005] рассмотрен процесс установления температуры такого источника тепла в гидратсодержащих осадках и показано, что характер изменения температуры зонда может существенно нарушаться в ходе диссоциации газогидратов.

Для более детального изучения температурного поля линейного источника тепла постоянной мощности, размещенного в гидратсодержащих осадках, коллектив исследователей из ИНХ СО РАН и ИНГГ СО РАН провел соответствующие лабораторные эксперименты. Результаты исследований достаточно подробно представлены в работах [Дучков и др., 2006, 2009а; Пермяков, 2010]. Эти исследования позволили сформулировать основные положения геотермического метода поисков скоплений газовых гидратов в донных осадках водоемов [Дучков и др., 2009б].

В данной статье основное внимание обращено на разработку методики количественной интерпретации результатов лабораторных экспериментов и обоснование оптимальной методики полевых геотермических работ.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Выполненные в 2005—2009 гг. при участии авторов лабораторные эксперименты были ориентированы на изучение отклика гидратсодержащей среды на тепловой импульс от цилиндрического зонда [Дучков и др., 2006, 2009а; Пермяков, 2010]. Для этого в ИНХ СО РАН была создана лабораторная установка, позволяющая моделировать образцы, содержащие гидраты метана, и измерять их теплопроводность при разных P - T условиях. Основным элементом установки является стальная камера высокого давления, в которой из смеси кварцевого песка и льда моделировались образцы, содержащие гидраты метана. Разработанная методика позволяла в течение суток получать образец с относительно большим (до 2—3 мас. %) содержанием газогидрата, равномерно распределенного по объему.

Для измерения теплопроводности образцов использовался уже упоминавшийся метод цилиндрического зонда постоянной мощности. Реализующая этот метод аппаратура состоит из зонда и автономного измерительного устройства. Зонд представляет собой стальную трубку, вмещающую нагреватель (манганиновая проволока) и датчик температуры (терморезистор), и располагается в центре камеры (образца). Удельная мощность нагревателя изменялась в разных экспериментах от 1 до 25 Вт/м. При измерении теплопроводности на 10—15 мин включался нагреватель и записывались в полулогарифмическом масштабе графики нагревания зонда во времени (термограммы), типа приведенных на рис. 1 и 2. В первые 20—30 с после включения нагревателя наблюдается быстрое нелинейное нагревание зонда. После

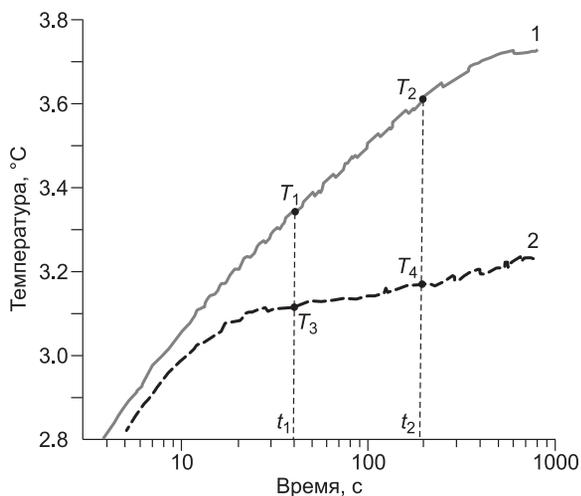


Рис. 1. Термограммы, зафиксированные при измерении теплопроводности гидратсодержащего образца в первом эксперименте (при постоянной удельной мощности нагревателя $Q_1 = 1.3$ Вт/м).

Для обеих термограмм: стартовая температура 2.2 °С; состав образца (мас. %): песок — 96.2; вода — 1.6; гидрат — 2.2; длина зонда (нагревателя) $L = 120 \cdot 10^{-3}$ м; радиус зонда $r_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ м. Остальные данные (давление P , максимальная температура эксперимента T_m , равновесная температура разложения гидрата метана T_p , расчетная теплопроводность λ_p) указаны для отдельных графиков: График 1 (гидраты в стабильном состоянии) — $P = 4.59$ МПа, $T_m = 3.7$ °С, $T_p = 5.8$ °С; $\lambda_p = 0.7$ Вт/(м·К). График 2 (гидраты разлагаются) — $P = 3.25$ МПа, $T_m = 3.3$ °С, $T_p = 2.2$ °С, $\lambda_p = 3.2$ Вт/(м·К). Координаты линейных участков термограмм: $t_1 = 40$ с, $\ln t_1 = 3.69$, $t_2 = 190$ с, $\ln t_2 = 5.25$, $T_1 = 3.35$ °С, $T_2 = 3.6$ °С, $T_3 = 3.12$ °С, $T_4 = 3.17$ °С.

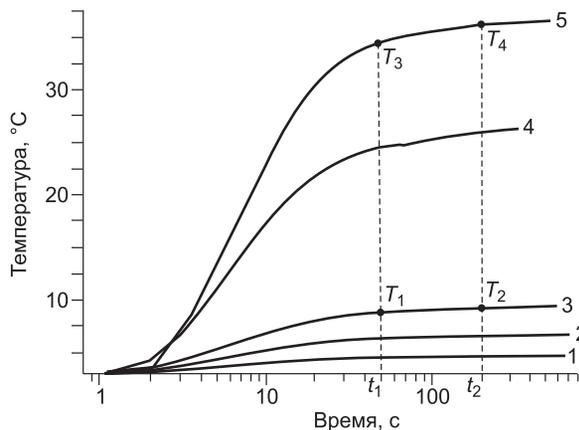


Рис. 2. Термограммы, зафиксированные при измерении теплопроводности гидратсодержащего образца во втором («полевом») эксперименте (при постоянном давлении в камере — $P = 11.16$ МПа).

Для термограмм 1—5: начальная температура $T_{нач} = 3$ °С, состав образца (мас. %): песок — 97; гидрат метана — 3 (7.7 г во всем образце); длина зонда (нагревателя) $L = 120 \cdot 10^{-3}$ м; радиус зонда $r_0 = r_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ м; температура разложения газогидрата 14 °С; теплопроводность определялась в интервале $50—200$ с. Остальные данные (максимальная температура $T_{макс}$, мощность нагревателя Q , расчетная теплопроводность λ_p) указаны для каждой термограммы отдельно: термограмма 1 (стабильные газогидраты): $T_{макс} = 4.6$ °С, $Q = 0.75$ Вт/м, $\lambda_p = 0.62$ Вт/(м·К); термограмма 2 (стабильные газогидраты): $T_{макс} = 6.6$ °С, $Q = 1.7$ Вт/м, $\lambda_p = 0.67$ Вт/(м·К); термограмма 3 (стабильные газогидраты): $T_{макс} = 9.4$ °С, $Q = 3$ Вт/м, $\lambda_p = 0.67$ Вт/(м·К); термограмма 4 (нестабильные газогидраты): $T_{макс} = 26.4$ °С, $Q = 12$ Вт/м, $\lambda_p = 0.8$ Вт/(м·К); термограмма 5 (нестабильные газогидраты): $T_{макс} = 37$ °С, $Q = 22.7$ Вт/м, $\lambda_p = 1.41$ Вт/(м·К). Координаты линейных участков термограмм 3 и 5: $t_1 = 50$ с, $\ln t_1 = 3.91$, $t_2 = 200$ с, $\ln t_2 = 5.3$, $T_1 = 8.73$ °С, $T_2 = 9.12$ °С, $T_3 = 34.47$ °С, $T_4 = 36.25$ °С.

этого обычно устанавливается достаточно длительное линейное увеличение температуры, описываемое формулой [Von Herzen, Maxwell, 1959]:

$$T = Q / (4 \cdot \pi \cdot \lambda) \ln [(4 \cdot k \cdot t) / (1.7811 \cdot r_0^2)], \quad (1)$$

где Q — удельная мощность нагревателя, t — время действия нагревателя, $r_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ м — радиус зонда, λ и k — коэффициенты теплопроводности и температуропроводности образца соответственно.

Угол наклона линейного участка термограммы зависит от теплопроводности среды, которая может быть рассчитана из экспериментальных данных по формуле [Von Herzen, Maxwell, 1959]:

$$\lambda = [Q \cdot \ln(t/t_{i-1})] / [4 \cdot \pi \cdot (T_i - T_{i-1})], \quad (2)$$

где t_{i-1} и t_i — моменты времени, которым соответствуют температуры T_{i-1} и T_i на линейном участке термограммы.

В ходе исследований выполнено несколько десятков экспериментов по моделированию гидратсодержащих образцов и измерению их теплопроводности. Основной целью исследований было выявление особенностей (аномалий) в изменении температуры зонда, вызванных процессом разложения гидратов. В этой связи для каждого образца выполнялось, как минимум, два измерения λ при разных (стабильном и нестабильном) состояниях газогидратов. В большей части экспериментов состояние гидратов регули-

Рис. 3. Общий вид погружного термозонда.

Правая (от стержня) стальная трубка — датчики для измерения температуры и геотермического градиента; левая трубка — устройство (нагреватель и датчики температуры) для измерения теплопроводности осадков цилиндрическим зондом постоянной мощности на четырех глубинах [Handbook..., 1988].

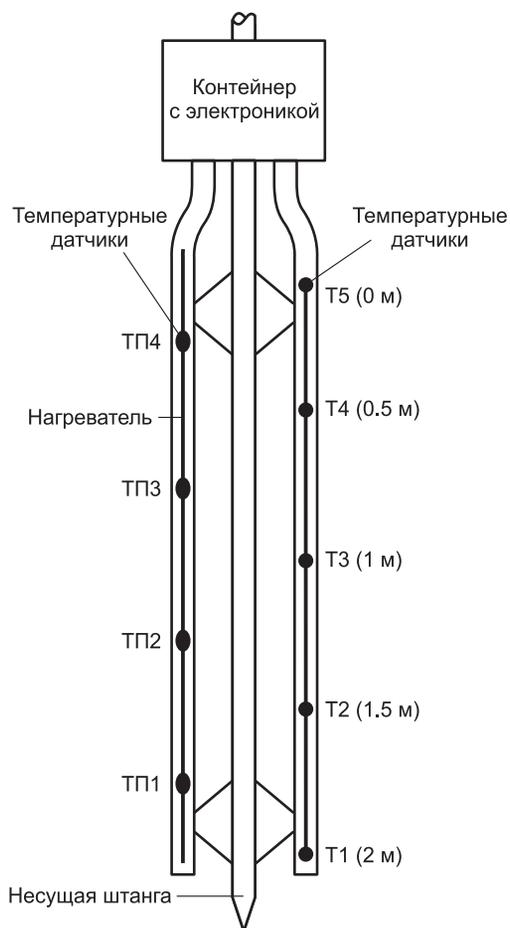
рвалось сменой давления в камере при сохранении мощности нагревателя. В альтернативном, названном нами «полевым», эксперименте давление оставалось постоянным, а состояние газогидратов регулировалось изменением мощности нагревателя. Кратко рассмотрим результаты этих экспериментов.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ, В ХОДЕ КОТОРЫХ СОСТОЯНИЕ ГАЗОГИДРАТОВ РЕГУЛИРОВАЛОСЬ ИЗМЕНЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ

Термограммы, полученные в одном из таких экспериментов, представлены на рис. 1. Первая из них соответствует стабильному состоянию газогидратов, которое обеспечивается в течение всего измерительного периода высоким давлением в камере. В этом случае тепло нагревателя расходуется только на увеличение температуры зонда и прилегающей к нему части образца. Перед записью второй термограммы в камере снижалось давление и газогидраты переводились в состояние, близкое к нестабильному. В результате через некоторое время после включения нагревателя начиналось разложение газогидрата вблизи зонда. На это расходуется значительная часть тепла, выделяемого нагревателем, что приводит к замедлению роста температуры (термограмма 2) при той же его мощности. По формуле (2) может быть выполнен расчет теплопроводности для каждой из термограмм (все необходимые для этого параметры приведены в подрисуночной подписи к рис. 1). Истинная теплопроводность гидратсодержащего образца, вычисленная по термограмме 1, составляет 0.7 Вт/(м·К). Формальный расчет теплопроводности по линейной части термограммы 2 приводит к аномально высоким значениям этого параметра, порядка 3.2 Вт/(м·К). Наблюдаемое увеличение расчетной теплопроводности связано с отбором части тепла на разложение газогидратов. Необходимо сразу уточнить, что при разложении газогидратов теплопроводность образца не должна заметно измениться, так как гидрат метана и вода, образующаяся при его разложении, имеют примерно одинаковую теплопроводность, порядка 0.5 Вт/(м·К) [Истомин, Якушев, 1992].

В результате проведенных опытов установлено, что разложение газогидратов отчетливо фиксируется уменьшением значений температуры зонда и замедлением темпа ее роста (см. рис. 1), а также резким возрастанием расчетной теплопроводности. Указанные особенности температурного поля являются несомненными признаками (индикаторами) наличия гидратов в образце.

Важно отметить, что подобные особенности зафиксированы и в полевых условиях при измерении *in situ* теплопроводности поддонных осадков в пределах газогидратного поля, выявленного в северо-западной части Черного моря [Кутас и др., 2005]. Глубина дна здесь 800—900 м, температура поддонных осадков — 8.8—8.9 °С, равновесная температура гидрата метана в такой обстановке должна составлять 11.5—11.8 °С. Чтобы разложить газогидраты в таких условиях, достаточно нагреть поддонные осадки на 3—4 °С. В качестве измерительной аппаратуры применялся погружной термозонд ГЕОС-2 (рис. 3), в котором для измерения λ реализован метод цилиндрического зонда постоянной мощности, равной 15 Вт/м. Судя по приведенным в работе [Кутас и др., 2005] данным, такой зонд за 50 с нагревает прилегающие осадки на 11—13 °С и обеспечивает необходимые для разложения газогидратов условия. При измерении теплопроводности безгидратных и гидратсодержащих осадков фиксировались термограммы, подобные показанным на рис. 1. В подтверждение этого можно указать, что при размещении в безгидратных осадках зонд, измеряющий λ , разогревался после включения нагревателя в интервале 100—300 с на 1.5 °С, а в гидратсодержащих осадках — всего лишь на 0.5 °С. Заметное снижение во втором случае скорости нарастания температуры зонда авторами, на наш взгляд, правильно связали с тепловыми эффектами раз-



ложения газогидратов. Таким образом, для распознавания (поисков) гидратсодержащих осадков можно использовать стандартную технологию измерения теплового потока через дно водоемов, включающую измерение *in situ* теплопроводности поддонных осадков. Необходимым условием при этом является применение нагревателей, удельная мощность которых достаточна для разложения газогидратов при существующих в каждом конкретном случае P - T условиях на дне водоема.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ, В ХОДЕ КОТОРЫХ СОСТОЯНИЕ ГАЗОГИДРАТОВ РЕГУЛИРОВАЛОСЬ ИЗМЕНЕНИЕМ МОЩНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЯ

Более надежным, на наш взгляд, может быть иной метод поисков гидратсодержащих поддонных осадков, заключающийся в выполнении в течение одного спуска термозонда (т.е. в одном пункте) двух измерений теплопроводности с использованием различных по мощности нагревателей. Для проверки реальности такого подхода А.Ю. Манаковым и М.Е. Пермяковым были выполнены специальные лабораторные исследования, учитывающие полевые условия.

На первом этапе этих экспериментов, как и ранее, происходило моделирование гидратсодержащего образца в камере высокого давления. В качестве начальных условий были приняты значения давления и температуры, характерные для поддонных осадков оз. Байкал на глубине порядка 1 км ($P \sim 10$ МПа, $T \sim 3^\circ\text{C}$, температура разложения газогидратов на этой глубине $\sim 14^\circ\text{C}$). После наработки газогидрата производились измерения теплопроводности образцов, в течение которых давление в камере сохранялось постоянным, а нестабильность газогидратов достигалась изменением мощности нагревателя. Результаты одного из экспериментов приведены на рис. 2.

Сначала были выполнены измерения с маломощными (0.75—3 Вт/м) нагревателями (термограммы 1—3). Температура зонда в этом случае не превышала 10°C , и стабильное состояние гидратов не нарушалось. После каждого измерения в камере восстанавливалась начальная температура (3°C). По линейным частям каждой термограммы были получены практически одинаковые значения истинной теплопроводности образца, которая составила в среднем 0.65 ± 0.02 Вт/(м·К).

Завершился эксперимент измерениями с нагревателями, мощность которых превышала 10 Вт/м. Мощности 12 Вт/м соответствует термограмма 4. За время измерения (~ 5 мин) зонд прогрелся до 26°C (на 12°C выше равновесной температуры) и вокруг него должно было начаться плавление газогидрата, что и отразилось на значении расчетной теплопроводности, выросшей до 0.8 Вт/(м·К). После выключения зонда и восстановления начальной температуры было выполнено измерение с еще большей мощностью (22.7 Вт/м) нагревателя (термограмма 5). В это время температура зонда превысила 37°C (на 23°C выше равновесной температуры), что, несомненно, должно было привести к более активному плавлению газогидратов в образце. Расчетная теплопроводность в этом случае увеличилась до 1.4 Вт/(м·К).

Записанные термограммы (см. рис. 2) в целом похожи, а их расположение определяется мощностью нагревателя. Визуально не заметно ранее наблюдавшихся (см. рис. 1) отличий, обусловленных разными состояниями (стабильным и нестабильным) газогидратов. Следовательно, при данной методике индикаторами присутствия газогидратов в осадке могут служить только различия в значениях истинной и расчетной теплопроводности.

Завершая краткое описание результатов экспериментов необходимо обратить внимание на следующее.

Образцы, использованные нами в описанных экспериментах, безусловно, не являются точной моделью реальных морских или озерных осадков. Образцы имеют иной компонентный состав, в них содержится больше свободного газа, механизм их формирования отличается от природного. И тем не менее мы полагаем, что даже наша несовершенная лабораторная модель реальных осадков дает правильную в качественном отношении картину. Об этом, в частности, свидетельствуют результаты полевых экспериментов, описанные в статье [Кутас и др., 2005].

Известно, что при разложении газогидратов происходит значительное выделение свободного газа, обладающего аномально низкой теплопроводностью. Появление дополнительных объемов газа в осадке вокруг зонда должно приводить к уменьшению теплопроводности среды и, соответственно, к росту температуры зонда. Судя же по нашим данным (см. рис. 1, 2), а также по результатам полевых геотермических работ [Кутас и др., 2005], влияние газа не ощущается. Причина заключается в том, что во всех рассмотренных экспериментах измерительная установка устроена так, что газ, выделяющийся в процессе распада газогидратов, свободно удаляется из образца во внешний объем вдоль зонда или по связанному между собой порам. Серией специальных экспериментов нам удалось показать [Дучков и др., 2009а], что при отсутствии дренажа выделяющегося газа эффект его накопления может быть весьма значительным. Газ способен существенно изменить как вид получаемой термограммы, так и величину расчетной теплопроводности.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ ГИДРАТСОДЕРЖАЩИХ ОСАДКОВ

Описанные выше лабораторные эксперименты убедительно показали, что для выявления гидратсодержащих осадков в поддонных отложениях водоемов необходимо выполнить в одном пункте дна, как минимум, два измерения *in situ* теплопроводности с разной мощностью теплового источника ($Q_1 < Q_2$). Значение Q_1 должно быть подобрано так, чтобы дополнительный источник тепла не приводил к распаду газогидратов в конкретных условиях. При втором измерении мощность должна быть увеличена настолько, чтобы надежно привести к плавлению газогидратов, рассеянных вблизи зонда. Выбор мощностей теплового источника определяется глубиной водоема и температурой донных осадков (чем глубже водоем и ниже температура, тем стабильнее газогидраты в донных осадках и больше тепла необходимо для их разложения).

Для выполнения измерений теплопроводности *in situ* можно использовать погружные многоканальные термозонды, обычно применяемые при изучении теплового потока через дно акваторий [Handbook..., 1988; Кутас и др., 2005]. Общий вид наиболее часто применяемого термозонда показан на рис. 3. Обычно он имеет два измерительных канала: в одной (на рисунке в правой) стальной трубке размещаются датчики, измеряющие значения температуры и геотермического градиента; вторая (левая) трубка представляет собой цилиндрический зонд для измерения теплопроводности. Стальные трубки обычно укрепляются симметрично друг относительно друга, каждая на расстоянии 5—10 см от стержня. При полном внедрении такой термозонд позволяет одновременно измерять теплопроводности осадков на четырех глубинах.

При наличии указанного термозонда можно предложить, например, такой порядок действий. После внедрения термозонда в поддонные осадки в течение 3—5 мин фиксируется восстановление его температуры. Затем включается маломощный нагреватель Q_1 и в течение 10 мин записывается первая термограмма. После пятиминутной выстойки мощность нагревателя увеличивается до Q_2 и записывается в течение 10 мин вторая термограмма. Мощности нагревателей заранее рассчитываются с учетом глубины водоема и температуры осадков. Таким образом, общее время эксперимента данным оборудованием составит 25—30 мин. В реальных морских условиях, особенно при наличии сильного дрейфа, довольно сложно осуществить такой длительный эксперимент.

Время эксперимента может быть сокращено почти в два раза, если термозонд несколько модифицировать, а именно заменить температурные датчики в правой трубке устройством для измерения λ . Такой термозонд позволяет выполнить одновременно измерения теплопроводности с разными по мощности нагревателями. Весь эксперимент займет не более 15 мин.

Если осадки не содержат газогидратов, то в результате предлагаемого полевого эксперимента на каждой глубине мы получим с разными по мощности источниками одинаковые (или близкие) оценки теплопроводности. При наличии газогидратов в осадках и правильном подборе мощностей нагревателей будут получены разные оценки теплопроводности. Под действием маломощного источника газогидраты не будут разлагаться, и измеренная теплопроводность осадков будет соответствовать истинной. Более мощный нагреватель вызовет разложение газогидратов вокруг зонда и заметное возрастание расчетной теплопроводности. Получение двух различных значений λ является очевидным признаком наличия рассеянных газогидратов в разрезе. При последующей совместной интерпретации записанных термограмм можно будет получить, как будет показано ниже, дополнительную информацию о содержании газогидратов в донных осадках.

Более просто задача может быть решена при применении в ходе эксперимента *in situ* двух различных методов измерения теплопроводности. Истинную теплопроводность осадков можно оценить в результате записи и интерпретации температурных аномалий (пики внедрения), возникающих при вхождении датчиков в осадки [Lee et al., 2003]. Амплитуда пиков внедрения обычно невелика (до 2—3 °С), такое увеличение температуры не приведет к диссоциации газогидратов. После установления температуры достаточно произвести измерение теплопроводности методом игольчатого зонда с применением мощного нагревателя.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ТЕРМОГРАММ

Выше показано, что сравнение двух термограмм, записанных при стабильном и нестабильном состояниях газогидратов, а также рассчитанных по ним значений теплопроводности позволяет однозначно судить о наличии или отсутствии газогидратов в образце. Актуальной является задача количественной интерпретации термограмм с целью оценки содержания газогидратов в осадках. Такие попытки уже предпринимались в работах [Голубев, 1998; Кутас и др., 2005]. Однако они вызывают сомнения, так как для оценки продвижения фазового фронта авторы этих работ использовали уравнение (1), которое описывает лишь процесс нагревания среды и не учитывает процесс разложения газогидрата. К тому же

в лабораторных экспериментах [Дучков и др., 2006, 2009а] показано, что процесс нагревания продвигается быстрее фронта фазового перехода, а разложение гидратов начинается после прогревания среды на 1—2 °С выше равновесной температуры. Эти наблюдения привели нас к необходимости более детального изучения данного вопроса [Дучков и др., 2010].

Термограммы рис. 1. Обратимся к термограммам рис. 1 и напомним, что истинная теплопроводность образца, определенная по термограмме 1, составляет $\lambda_1 = 0.7$ Вт/(м·К), тогда как эффективная теплопроводность, рассчитанная по термограмме 2, оказывается значительно выше, 3.2 Вт/(м·К). Это связано с тем, что часть мощности нагревателя во втором случае была затрачена на разложение газогидратов. Реально же, как выше отмечалось, теплопроводность образца и во втором случае (λ_2) не должна существенно отличаться от λ_1 . Принимая $\lambda_2 = \lambda_1$, можно оценить часть мощности нагревателя (Q_n), которая расходуется во втором эксперименте на нагревание образца. Для этого перепишем формулу (2) относительно Q :

$$Q = 4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (T_i - T_{i-1}) / \ln(t_i / t_{i-1}). \quad (3)$$

Если в (3) подставить значение λ_1 , то найдем тепловую мощность, затраченную на нагревание $Q_n \approx 0.2$ Вт/м, а затем и часть мощности Q_p , истраченной на разложение газогидратов: $Q_p = Q_1 - Q_n = 1.1$ Вт/м.

Выполненные оценки позволяют определить тепловую энергию W , затраченную за время $t_2 - t_1 \approx 150$ с на разложение газогидрата, а затем и массу m разложившегося в это время газогидрата по формулам:

$$W = Q_p L (t_2 - t_1) = 19.8 \text{ Дж}, \quad (4)$$

$$m = W / \zeta = 4.37 \cdot 10^{-5} \text{ кг} = 44 \text{ мг}, \quad (5)$$

где $\zeta = 453 \cdot 10^3$ Дж/кг — энергия разложения гидрата метана на газ и воду [Истомин, Якушев, 1992].

Скорее всего, не весь газогидрат успел за указанное время разложиться в затронутом диссоциации слое образца. Поэтому можно утверждать, что в этом слое содержится > 44 мг газогидрата.

Таким образом, интерпретация двух термограмм (типа приведенных на рис. 1) позволяет не только однозначно судить о наличии или отсутствии газогидрата в образце, но и достаточно точно определить массу разложившегося за определенное время газогидрата в слое вокруг зонда.

Зная m и объем V , в котором разложился газогидрат, можно оценить и содержание газогидрата в единице объема (C_r):

$$C_r = m / V, \text{ кг/м}^3 \text{ или } C_r = m / (V \rho_0), \% \quad (6)$$

где $\rho_0 = 917$ кг/м³ — плотность чистой фазы гидрата метана [Истомин, Якушев, 1992].

Объем можно определить по формуле

$$V = \pi L (r_2^2 - r_1^2), \quad (7)$$

где $L = 120 \cdot 10^{-3}$ м — длина зонда, $r_1 = r_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ м — радиус зонда, r_1 и r_2 — удаленность фазового фронта от оси зонда в моменты t_1 (стенка нагревателя) и t_2 .

Основная трудность заключается в том, что мы не умеем определять положение фронта разложения газогидрата во времени.

Попытаемся это сделать, записав условие баланса между количеством тепла, поступающим в элемент объема $dS dr$ за время dt , и теплом, затраченным на разложение газогидрата в том же элементе объема:

$$q_p(r) dS dt = \zeta \rho_r dS dr. \quad (8)$$

Здесь $\rho_r = C_r \cdot 917$ кг/м³ — реальная плотность газогидрата в образце, $q_p(r) = Q_p / (2 \pi r)$ — плотность радиального теплового потока, обеспечивающего разложение газогидрата на расстоянии r от нагревателя.

Решение уравнения (8) можно записать в виде

$$r^2(t) = b (t - t_1) + r_1^2 \text{ при } t_1 \leq t \leq t_2 \quad (9)$$

и

$$b = Q_p / (\pi \zeta \rho_r) = Q_p / (\pi \zeta C_r \cdot 917), \text{ м}^2/\text{с}. \quad (10)$$

Соответственно, выражение для расчета объема части образца, затронутого процессом разложения газогидратов, можно записать иначе:

$$V = \pi L (r_2^2 - r_1^2) = \pi L b (t_2 - t_1). \quad (11)$$

Очевидно, что при описании процесса разложения газогидрата ключевую роль играет величина b , определяющая скорость продвижения фазового фронта и имеющая размерность коэффициента температуропроводности (k). Между величинами b и k имеется существенное различие. Если k является постоянной характеристикой среды (в нашем случае $k \approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ [Пермяков, Аюнов, 2008]), то b зависит от мощности нагревателя и содержания газогидрата. Нетрудно видеть, что формулы (6), (7), (9), (10) оказались взаимозависимыми. Это не позволяет оценить содержание газогидратов в осадке C_r только по экспериментальным термограммам.

Поскольку мы изучали искусственный образец, в котором содержание гидрата метана известно по условиям моделирования, $C_r = 0.022$ (см. рис. 1), то это позволяет оценить значение b по формуле (10): $b = 3.8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. При увеличении мощности нагревателя параметр b будет увеличиваться, а при увеличении концентрации гидратов — наоборот, уменьшаться. Очевидно, что в условиях нашего эксперимента продвижение фронта разложения газогидрата происходило существенно медленнее, чем нагревание образца. Скорость нагревания образца составляла $\sim 0.06 \text{ мм}/\text{с}$, а скорость движения фазового фронта $\sim 0.015 \text{ мм}/\text{с}$. В этой связи интересно определить, какой объем образца был за период $t_2 - t_1$ затронут нагреванием (V_n), а какой — процессом разложения газогидрата (V_r). Расчет может быть сделан по формуле (11), при использовании в первом случае вместо b $k \approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, а во втором — значение $b = 3.8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. В результате получаем:

$$V_n = \pi \cdot L \cdot k \cdot (t_2 - t_1) = 3.39 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \quad \text{и} \quad V_r = \pi \cdot L \cdot b \cdot (t_2 - t_1) = 0.22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Таким образом, объемы, затронутые разными процессами, также существенно различаются.

Оценить массу разложившегося в процессе эксперимента газогидрата можно и другим путем. Для этого вернемся к формуле (4) и запишем одно и то же количество энергии, выделившееся нагревателем в двух разных экспериментах (термограммы 1 и 2, см. рис. 1) за время $t_2 - t_1$, в виде

$$\begin{aligned} \text{в первом эксперименте} \quad Q_1 \cdot L \cdot (t_2 - t_1) &= R \cdot (T_3 - T_1), \\ \text{во втором эксперименте} \quad Q_1 \cdot L \cdot (t_2 - t_1) &= R \cdot (T_4 - T_2) + W, \end{aligned}$$

где R — множитель, характеризующий теплоемкость нагревателя и окружающей его части образца. Очевидно, что множитель R слабо зависит от разности температур и его можно сократить. В результате получаем соотношение

$$W = Q_1 \cdot L \cdot (t_2 - t_1) [1 - (T_4 - T_2)/(T_3 - T_1)],$$

которое снова приводит к значению $W = 19.8 \text{ Дж}$, а затем и полученным ранее оценкам m и b . Такая устойчивость к кажущимся различными исходным предположениям позволяет оценивать полученные результаты как твердо установленные.

Термограммы рис. 2. Описанная методика интерпретации применима и к термограммам, записанным в течение «полевого» эксперимента (см. рис. 2). Для интерпретации выберем термограммы 3 (стабильные газогидраты, $Q_1 = 3 \text{ Вт}/\text{м}$) и 5 (нестабильные газогидраты, $Q_2 = 22.7 \text{ Вт}/\text{м}$). По условиям моделирования в образце содержится около 7.7 г гидратов метана, а $C_r = 0.03$.

Известно, что истинное значение теплопроводности гидратсодержащего образца в данном эксперименте составляет $\lambda_1 = 0.65 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, а расчетная теплопроводность образца с нестабильными газогидратами — $1.4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Все необходимые данные для последующих расчетов приведены в подрисуночной надписи к рис. 2.

По-прежнему полагая, что теплопроводность образца не изменилась при разложении газогидратов, оценим по формуле (3) часть мощности, затраченной на нагревание образца при проведении второго опыта (термограмма 5),

$$Q_n = 4 \cdot \pi \cdot \lambda_1 \cdot (T_2 - T_1) / \ln(t_2/t_1) = 10.3 \text{ Вт}/\text{м}.$$

Соответственно, на разложение газогидратов затрачено

$$Q_p = Q_2 - 10.3 = 12.4 \text{ Вт}/\text{м}.$$

Оценим по формулам (4) и (5) количество тепловой энергии W , затраченной на плавление газогидрата за время $(t_2 - t_1)$, и массу разложившегося при этом газогидрата:

$$W = 223.2 \text{ Дж} \quad \text{и} \quad m = 0.493 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \sim 0.5 \text{ г}.$$

Так как в данном эксперименте применялся весьма мощный нагреватель, то представляет интерес оценить для данного случая значение параметра b , характеризующего скорость продвижения фазового фронта. По формуле (10) $b = 3.2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ (примерно в два раза ниже значения k). Как и ожидалось, при

увеличении мощности нагревателя значение b быстро увеличивается. По формуле (9) примерно оценим расстояние, на которое за 750 с (весь период измерений с мощным нагревателем, см. рис. 2) перемещаются в образце фронты температурной волны (r_T) и фазового перехода (r_r). При расчете r_T используем $k = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, при расчете r_r — $b = 3.2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. В итоге получаем: $r_T \sim 2.1 \text{ см}$, а $r_r \sim 1.5 \text{ см}$. Это означает, что при планируемом расположении измерительных каналов в термозонде (см. рис. 3) температурные сигналы разных нагревателей будут надежно изолированы друг от друга.

Итак, выполненный анализ показал, что на данном этапе развития методики количественной интерпретации результатов измерений теплопроводности представляется возможным достаточно уверенно определять наличие в образце (или в осадках) газогидратов, и примерно оценивать их содержание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные эксперименты по моделированию гидратсодержащих образцов и измерению их теплопроводности методом цилиндрического зонда постоянной мощности при разных P - T условиях позволили существенно продвинуться в понимании физических процессов, которые происходят при формировании и диссоциации гидратов метана. В свою очередь, это позволило сформулировать основные принципы геотермического метода поисков гидратсодержащих осадков посредством измерения *in situ* их теплопроводности цилиндрическими зондами разной мощности. Анализ данных показал, что интерпретация двух термограмм, соответствующих разным состояниям (стабильному и нестабильному) газогидратов, позволяет однозначно судить о наличии или отсутствии в образце (или в осадках) газогидратов и определять массу газогидрата, разложившегося за определенный промежуток времени. По этим данным можно получить и некоторую оценку концентрации газогидрата в среде, используя приближенное значение параметра b , характеризующего скорость продвижения фронта разложения газогидратов ($b \sim 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$).

Таким образом, обоснование геотермического метода обнаружения газогидратов в поддонных осадках в рамках выполненных лабораторных исследований можно считать завершенным. Важной задачей сейчас является разработка и изготовление термозонда, а также проведение полевых экспериментов для наработки необходимого опыта. При постановке полевых измерений необходимо учитывать, что искомый температурный сигнал может быть зафиксирован только в том случае, если частицы газогидрата содержатся в осадке, непосредственно окружающем зонд. Это означает, что при интерпретации экспериментальных термограмм большую неопределенность может вносить неоднородность распределения скоплений газогидрата вокруг зонда. Поэтому для надежности получаемых результатов, возможно, потребуется значительное число повторных измерений. Очевидно также, что при практической реализации метода могут возникнуть и другие проблемы.

Отметим, что рассмотренный метод может быть применен и для обнаружения и оценки содержания газогидратов в горных породах, вскрытых скважинами. Для этого необходимо пробурить шпур в стенке скважины (техника для этого имеется [Геофизические исследования..., 2009]), доставить цилиндрический зонд постоянной мощности в пласт и выполнить измерения теплопроводности *in situ* с разными нагревателями.

Работа поддержана грантом РФФИ № 08-05-00804-а и интеграционным проектом СО РАН № 62 (2009—2011 гг.) «Фундаментальные вопросы физической химии газовых гидратов – исследования в интересах практического использования». Авторы благодарят А.Ю. Манакова и М.Е. Пермякова за предоставленные материалы и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

Геофизические исследования скважин: справочник мастера по промышленной геофизике / Под ред. В.Г. Мартынова, Н.Е. Лазуткиной, М.С. Хохловой. М., Инфраинженерия, 2009, 960 с.

Гинзбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. СПб., ВНИИОкеангеология, 1994, 199 с.

Голубев В.А. Свидетельства присутствия газогидратов в верхнем слое донных осадков озера Байкал: результаты измерений теплопроводности *in situ* // Докл. РАН, 1998, т. 358, № 3, с. 384—388.

Гольмшток А.Я., Дучков А.Д., Рощина Н.А. О возможности обнаружения донных скоплений газовых гидратов геотермическим методом // Вопросы геофизики. Вып. 38. СПб., Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2005, с. 130—147 (Ученые записки СПбГУ; № 438).

Дучков А.Д. Газогидраты метана в осадках озера Байкал // Российский химический журнал, 2003, т. XLVII, № 3, с. 91—100.

Дучков А.Д., Манаков А.Ю., Казанцев С.А., Пермяков М.Е., Огиенко А.Г. Экспериментальное моделирование и измерение теплопроводности пород, содержащих гидраты метана // Докл. РАН, 2006, т. 408, № 5, с. 656—659.

Дучков А.Д., Манаков А.Ю., Казанцев С.А., Пермьяков М.Е., Огиенко А.Г. Измерение теплопроводности синтетических образцов донных осадков, содержащих гидраты метана // *Физика Земли*, 2009а, № 8, с. 42—50.

Дучков А.Д., Манаков А.Ю., Пермьяков М.Е., Казанцев С.А. Результаты исследований, направленных на развитие геотермического метода поисков поддонных скоплений гидратов метана // *ГЕО-Сибирь-2009*. Т. 2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технология поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: сборник матер. V Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2009», 20—24 апреля 2009 г. Новосибирск, СГТА, 2009б, с. 183—188.

Дучков А.Д., Истомин В.Е., Соколова Л.С. Геотермический метод оценки содержания газовых гидратов в донных осадках (по результатам лабораторных экспериментов) // *ГЕО-Сибирь-2010*. Т. 2. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Часть 1: сборник матер. VI Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2010», 19—29 апреля 2010 г., Новосибирск, СГТА, 2010, с. 91—96.

Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М., Недра, 1992, 236 с.

Клеркс Я., Земская Т.И., Матвеева Т.В., Хлыстов О.М., Намсараев Б.Б., Дагурова О.П., Голобокова Л.П., Воробьева С.С., Погодаева Т.П., Гранин Н.Г., Калмычков Г.В., Пономарчук В.А., Шоджи Х., Мазуренко Л.Л., Каулио В.В., Соловьев В.А., Грачев М.А. Гидраты метана в поверхностном слое глубоководных осадков озера Байкал // *Докл. РАН*, 2003, 393(6), с. 822—826.

Кузьмин М.И., Калмычков Г.В., Дучков А.Д., Гелетий В.Ф., Гольмшток А.Я., Карабанов Е.Б., Хахаев Б.Н., Певзнер Л.А., Йошида Н., Бажин Н.М., Дядин Ю.А., Ларионов Э.Г., Манаков А.Ю., Мандельбаум М.М., Ващенко И.Ф. Гидраты метана в осадках озера Байкал // *Геология рудных месторождений*, 2000, т. 42, № 1, с. 25—37.

Кутас Р.И., Кравчук О.П., Бевзюк М.И. Диагностика газогидратности придонного слоя осадков Черного моря по результатам измерения их теплопроводности *in situ* // *Геофизический журнал*, 2005, т. 27, № 2, с. 238—244.

Пермьяков М.Е. Эффективная теплопроводность гидратосодержащих образцов по результатам лабораторных измерений при различных *P-T*-условиях: Автореф. дис. ... к.т.н. Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2010, 16 с.

Пермьяков М.Е., Аюнов Д.Е. Измерение тепло- и температуропроводности сред, имитирующих гидратоносные донные осадки // *Современные проблемы и будущее геокриологии: материалы Международной молодежной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика П.И. Мельникова* (5—8 августа 2008 г., г. Якутск). Якутск, Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2008, с. 42—44.

Соловьев В.А. Глобальная оценка количества газа в субмаринных скоплениях газовых гидратов // *Геология и геофизика*, 2002, т. 43 (7), с. 648—661.

Handbook of Terrestrial Heat Flow Commission / Eds. R. Haenel, L. Rybach, L. Stegena. Dordrecht, Kluwer Academic Publisher, 1988, 500 p.

Lee Tien-Chang, Duchkov A.D., Morozov S.G. Determination of thermal conductivity and formation temperature from cooling history of friction-heated probes // *Geophys. J. Intern.*, 2003, v. 152, p. 433—442.

Von Herzen R., Maxwell A.E. The measurement of thermal conductivity of deep sea sediments by a needle probe method // *J. Geophys. Res.*, 1959, v. 64, № 10, p. 1557—1563.

*Рекомендована к печати 15 июля 2011 г.
О.П. Полянским*

*Поступила в редакцию
10 февраля 2011 г.*