

Лабораторное изучение акустических свойств гидратосодержащих осадков

Г. А. Дугаров^{1,*}, А. А. Дучков^{1,2,†}, А. Д. Дучков^{1,‡}, А. Н. Дробчик^{1,§}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 3

²Новосибирский государственный университет. Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2
(Статья поступила 29.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

Проведена серия лабораторных экспериментов по формированию гидратосодержащих образцов, гидраты метана и тетрагидрофурана (ТГФ), и изучению их акустических свойств. Также был проведен значительный объем экспериментов со льдом для сравнения его свойств с газогидратами. Были получены зависимости скоростей и поглощений продольных и поперечных волн в зависимости от гидратосодержания или коэффициента начального водонасыщения в случае со льдом. Зависимости для гидрата метана, ТГФ и льда показывают разный характер роста скоростей при увеличении гидратосодержания или коэффициента начального водонасыщения. Для метана и льда наибольший рост скоростей продольных и поперечных волн наблюдается в области небольших содержаний. Это коррелирует с данными по поглощению, в области небольших содержаний для метана и льда наблюдается резкое уменьшение величины поглощения. Для гидрата ТГФ наблюдается постепенный рост скоростей продольных и поперечных волн с увеличением гидратосодержания. Разница в зависимостях скоростей может объясняться разным типом нахождения гидрата или льда в поровом пространстве и требует использования разных моделей эффективных сред для их описания. Для случая гидрата ТГФ предлагается использовать модель формирования гидрата нецементирующего типа, а для гидрата метана и льда – цементирующего типа.

PACS: 43.35.Cg

УДК: 550.34.016

Ключевые слова: газовые гидраты, гидратосодержащие среды, акустические свойства, скорости продольных и поперечных волн, поглощение, обратная добротность.

ВВЕДЕНИЕ

Природные газовые гидраты широко распространены в природе и рассматриваются как перспективный нетрадиционный источник газа со значительными потенциальными ресурсами. Развитие и применение геофизических методов, направленных на поиски и разведку скоплений и месторождений природных газовых гидратов, сдерживается недостаточной изученностью физических свойств гидратосодержащих пород. Это связано со сложностью извлечения образцов без разложения содержащегося в них газогидрата. Изучение акустических свойств гидратосодержащих пород производится преимущественно на искусственных образцах, создаваемых в специализированных установках, позволяющих сформировать гидратосодержащий образец и провести соответствующие измерения без его извлечения. В данной работе рассматриваются результаты значительного объема экспериментов, проведенных на подобной установке [1].

Эксперименты проводились на неконсолидированных водонасыщенных образцах с последующей их заморозкой, а также на образцах, содержащих гидраты метана и ТГФ. Проводилась оценка скоростей и поглощения продольных и поперечных волн, проходящих через образец.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения экспериментов использовались неконсолидированные образцы, состоящие из кварцевого песка с преимущественным размером фракции 0.3–0.6 мм, перемешанного с дистиллированной водой. Полученная смесь помещалась в цилиндрическую ячейку, внешний диаметр которой составлял 30 мм, внутренний — 26.6 мм, высота ячейки в среднем составляла 38 мм. Ячейка загружалась в камеру, где устанавливалось осевое и боковое давление порядка 25 МПа и температура, соответствующая области стабильности газогидрата. В случае формирования образцов, содержащих гидрат метана, в камеру подавался метан. При формировании образцов, содержащих гидрат ТГФ, песок смешивался не с водой, а с водным раствором ТГФ. Для ускорения процесса наработки гидрата применялись циклы заморозки/разморозки. Температура циклически варьировалась в пределах области стабильности гидрата.

При формировании гидрата метана итоговое значение гидратосодержания S_h в образце определялось количеством воды, используемым на этапе смешивания песка с водой. При формировании гидрата ТГФ итоговое значение гидратосодержания S_h в образце определялось массовой долей ТГФ в водном растворе ТГФ, используемом при изготовлении образца.

В процессе формирования гидрата проводились акустические измерения. В качестве источников и приемников импульсов использовались ультразвуковые датчики, изготовленные из пьезокерамических дисков диаметром 18 мм и толщиной 2 мм, по-разному поля-

*E-mail: dugarovga@ipgg.sbras.ru

†E-mail: duchkovaa@ipgg.sbras.ru

‡E-mail: duchkovad@ipgg.sbras.ru

§E-mail: drobchikan@ipgg.sbras.ru

ризованные для генерации и приема продольных и поперечных волн. Датчики имеют резонансную частоту 75 МГц (рабочий частотный диапазон 300–700 кГц, теоретическая мощность 1.8 Вт).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН

На рис. 1 приведены обобщающие результаты измерения скоростей продольных (синие маркеры) и поперечных (красные маркеры) волн в образцах, содержащих лед (треугольные маркеры), гидрат метана (крестики) и гидрат ТГФ (круглые маркеры), в зависимости от значения коэффициента начального водонасыщения S_w в случае со льдом или гидрасодержания S_h . Значение S_h (S_w) рассчитывается как отношение объема, занимаемого газогидратом (водой), к объему порового пространства образца. Линиями на рис. 1 приведена аппроксимация данных полиномами третьей степени: пунктирная — для образцов, содержащих лед, штриховая — гидрат метана, сплошная — гидрат ТГФ.

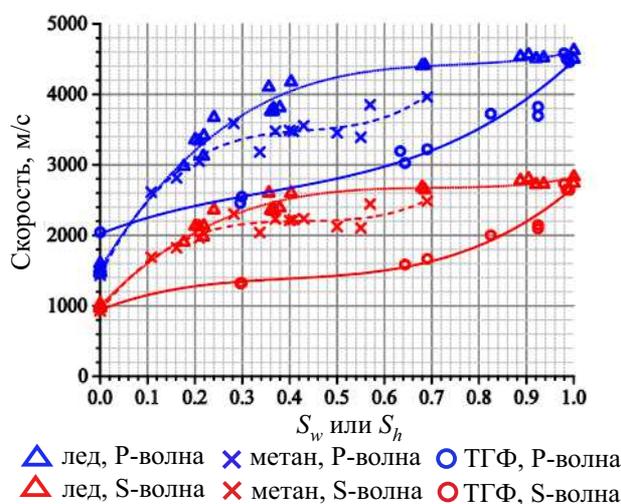


Рис. 1: Скорости продольных и поперечных волн в образцах, содержащих лед, гидрат метана и гидрат ТГФ, в зависимости от коэффициента водонасыщения S_w или гидратосодержания S_h , линиями представлена аппроксимация данных полиномами третьей степени

Для образцов, содержащих лед и гидрат метана, характерно резкое увеличение значений скоростей продольных и поперечных волн в самом начале, с увеличением S_w или S_h соответственно в интервале значений от 0 до 0.2. В случае с образцами, содержащими гидрат ТГФ, наблюдается постепенное увеличение скоростей с увеличением величины гидратосодержания S_h во всем интервале от 0 до 1. Такие различия могут быть объяснены разным типом нахождения льда или гидрата в поровом пространстве.

В работах [2, 3] выделяют четыре типа нахождения гидрата в поровом пространстве: заполняющий поры,

нагруженный, обволакивающий гранулы и контактно цементирующий. Последние два типа относятся к цементирующему типу, а первые два — к нецементирующему. Мы рассмотрим наши данные с точки зрения деления на эти две большие группы: цементирующего типа и нецементирующего. Для цементирующего типа характерно резкое увеличение скоростей при небольшом содержании гидрата (или льда) в поровом пространстве, что соответствует данным, полученным на образцах, содержащих лед и гидрат метана. Для нецементирующего типа характерно постепенное увеличение скоростей с увеличением количества гидрата, что соответствует данным, полученным на образцах, содержащих гидрат ТГФ. Для описания полученных зависимостей скоростей можно применить эффективные модели цементирующего и нецементирующего типов, описанных в работе [4].

Тем не менее, при рассмотрении области с большим содержанием льда или гидрата, $S_w > 0.2$, $S_h > 0.2$, наблюдаются различия в зависимости скоростей продольных и поперечных волн, полученных на образцах, содержащих лед и гидрат метана. В случае с гидратом метана наблюдается медленный рост скоростей, тогда как в случае со льдом наблюдается сравнительно быстрый рост с выходом на примерно постоянное значение при $S_w > 0.7$. При этом скорости продольных и поперечных волн в гидрате метана и льде, а также их плотности, весьма близки [5]. Здесь требуются дополнительные исследования, касающиеся возможности консервации метана в газообразной форме в сформированном газогидрате при больших значениях S_h , а также перехода не всего объема имеющейся в образце воды в газогидрат.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН

Для оценки величины поглощения использовался наиболее часто применяемый метод спектральных отношений. Для оценки величины поглощения проводится анализ отношения амплитудных спектров сигналов, прошедших через исследуемый образец и эталонный образец с большой добротностью (нами использовался алюминий). В качестве величины поглощения далее приводятся значения обратной добротности.

На рис. 2 приведены результаты оценки величины поглощения продольных (синие маркеры) и поперечных (красные маркеры) волн в образцах, содержащих лед (треугольные маркеры) и гидрат метана (крестики), в зависимости от значения коэффициента начального водонасыщения S_w в случае со льдом или гидрасодержания S_h . Видно резкое уменьшение величины поглощения в интервале значений S_w или S_h от 0 до 0.2, что коррелирует с данными полученными по скоростям и подтверждает предположение о цементирующем типе нахождения льда и гидрата метана в поровом пространстве в проведенных экспериментах. Далее

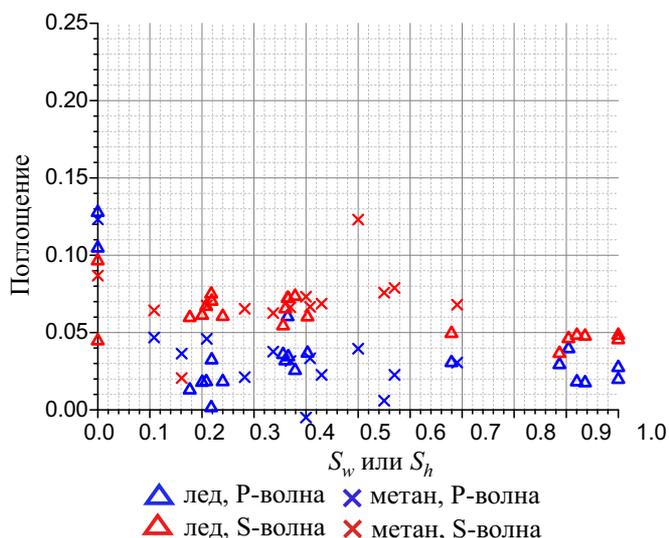


Рис. 2: Поглощение продольных и поперечных волн в образцах, содержащих лед и гидрат метана, в зависимости от коэффициента водонасыщения S_w или гидратосодержания S_h

с увеличением значений S_w или S_h величина поглощения остается примерно постоянной, для продольной волны средняя величина поглощения составляет 0.03, для поперечной — 0.06.

В случае с образцами, содержащими гидрат ТГФ, не наблюдается никакой систематической зависимости величины поглощения от гидратосодержания S_h . Отсутствие зависимости может быть связано с техническими проблемами, возникшими при проведении экспериментов, поэтому интерпретация этих данных до их подтверждения или

опровержения дополнительной серией экспериментов не имеет смысла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приведены результаты значительного объема экспериментов по формированию газогидратов, гидратов метана и ТГФ, в порах неконсолидированных образцов и измерению их акустических свойств. Эксперименты проводились также на образцах, содержащих лед.

В результате были получены зависимости скоростей продольных и поперечных волн от значения коэффициента водонасыщения S_w в случае со льдом или гидратосодержания S_h . Для образцов, содержащих лед и гидрат метана, характерно резкое увеличение значений скоростей продольных и поперечных волн в области небольших содержаний, $S_w < 0.2$, $S_h < 0.2$. В случае с образцами, содержащими гидрат ТГФ, наблюдается постепенное увеличение скоростей с увеличением значения гидратосодержания S_h . Такие различия могут быть объяснены разным типом нахождения льда или гидрата в поровом пространстве: цементирующий — для льда и гидрата метана, нецементирующий — для гидрата ТГФ. Данное предположение также подтверждается оценкой величины поглощения в образцах, содержащих лед и гидрат метана. Для них наблюдается резкое уменьшение величины поглощения в области небольших содержаний льда или гидрата в образце, $S_w < 0.2$, $S_h < 0.2$. При больших значениях S_w или S_h величина поглощения остается примерно постоянной, для продольной волны средняя величина поглощения составляет 0.03, для поперечной — 0.06.

[1] Дучков А. Д., Голиков Н. А., Дучков А. А., Манаков А. Ю., Пермяков М. Е., Дробчик А. Н. Сейсмические приборы. 2015. **51**. № 2. С. 44.

[2] Dvorkin J., Helgerud M. B., Waite W. F., Kirby S. H., Nur A. Introduction to physical properties and elasticity models (Chapter 20). In: Max M. D. (ed.) Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands. 2000. P. 245.

[3] Waite W. F., Santamarina J. C., Cortes D. D., Dugan B., Espinoza D. N., Germaine J., Jang J., Jung J. W., Kneafsey T. J., Shin H. et al. *Rev. Geophys.* 2009. **47**. RG4003.

[4] Ecker C., Dvorkin J., Nur A. *Geophys.* 1998. **63**. P. 1659.

[5] Lee J. Y., Yun T. S., Santamarina J. C. *Geochem. Geophys. Geosys.* 2007. **8**. N 6. Q06003.

Laboratory study of the acoustic properties of hydrate-bearing sediments

G.A. Dugarov^{1,a}, A.A. Duchkov^{1,2,b}, A.D. Duchkov^{1,c}, A.N. Drobchik^{1,d}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics. Novosibirsk, 630090, Russia

²Novosibirsk State University. Novosibirsk, 630090, Russia

E-mail: ^adugarovga@ipgg.sbras.ru, ^bduchkovaa@ipgg.sbras.ru, ^cduchkovad@ipgg.sbras.ru, ^ddrobchikan@ipgg.sbras.ru

A series of laboratory experiments on the formation of hydrate-bearing samples (hydrates of methane and tetrahydrofuran (THF)) and study of their acoustic properties were done. A significant amount of experiments with ice was also performed to compare its properties with gas hydrates. Dependences of the velocities and attenuation of compressional and shear waves on hydrate saturation or initial water saturation (for ice) were obtained. For methane and ice, the most increase of compressional and shear wave velocities

is observed in the area of low saturations. This correlates with the attenuation data, quick decrease of attenuation is observed in the area of low saturations for methane and ice. For THF hydrate a gradual increase of compressional and shear wave velocities with increasing hydrate saturation is observed. The differences in the velocity dependences can be explained by the different types of hydrate or ice location in the pore space and requires the use of different models of effective media for their description. For the case of THF hydrate, it is proposed to use the hydrate forming model of a non-cementing type, and for methane hydrate and ice — a cementing type.

PACS: 43.35.Cg.

Keywords: gas hydrates, hydrate-bearing medium, acoustic properties, compressional and shear wave velocities, attenuation, inverse quality.

Received 29 June 2017.

Сведения об авторах

1. Дугаров Гэсэр Александрович — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник; e-mail: dugarovga@ipgg.sbras.ru.
 2. Дучков Антон Альбертович — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией; тел.: (383) 363-67-14, e-mail: duchkovaa@ipgg.sbras.ru.
 3. Дучков Альберт Дмитриевич — доктор геол.-минерал. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (383) 330-25-91, e-mail: duchkovad@ipgg.sbras.ru.
 4. Дробчик Аркадий Николаевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: drobchikan@ipgg.sbras.ru.
-