

Экспериментальные акустические измерения на песчаных неконсолидированных образцах, содержащих гидрат метана

М. И. Фокин^{1,2,*}, Г. А. Дугаров^{1,†}, А. А. Дучков^{1,2,‡}

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

²Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2

(Статья поступила 20.06.2019; Подписана в печать 12.09.2019)

В работе рассматриваются результаты длительного эксперимента по изучению акустических свойств песчаного неконсолидированного образца, содержащего газовый гидрат метана. Эксперимент был разделен на два этапа: поддержание постоянных термобарических условий, соответствующих области стабильности гидрата метана и линейное изменение температуры образца. В результате было обнаружено два эффекта: падение скоростей как продольных, так и поперечных волн при длительной выдержке образца, содержащего гидрат метана, а также температурная зависимость акустических свойств — скоростей. С увеличением температуры наблюдается уменьшение значений скоростей с усилением этого эффекта при приближении к границе зоны стабильности гидрата метана. При длительной выдержке образца за примерно 400 ч скорости продольных и поперечных волн упали на 6% и 5% соответственно. Данные эффекты могут оказывать существенное влияние на интерпретацию результатов экспериментальных исследований гидратосодержащих образцов и должны быть учтены в ходе их проведения.

PACS: 43.35.Cg

УДК: 534.6

Ключевые слова: газовые гидраты, акустические свойства гидратосодержащих сред, скорости продольных и поперечных волн, временная зависимость скоростей, температурная зависимость скоростей.

ВВЕДЕНИЕ

Газовые гидраты являются кристаллическими соединениями, образованными включением молекул газа в полости кристаллического каркаса из молекул воды. Данные соединения образуются при определенных термобарических условиях: повышенное давление и пониженная температура, при наличии воды и гидратообразующего газа. Необходимые для формирования гидратов условия реализуются в так называемых зонах стабильности газогидратов в донных осадках акваторий, а также в криолитозоне. Большинство скоплений газогидратов были обнаружены в неконсолидированных глубоководных акваториальных осадках [1]. На территории России месторождения были обнаружены в осадках Каспийского, Черного, Охотского морей, а также в донных осадках озера Байкал. В настоящее время проявляется устойчивый интерес к разведке и оценке потенциальных запасов скоплений газовых гидратов. Интерес обусловлен энергетическим потенциалом гидратообразующего газа, который в большинстве скоплений состоит на 98 % из метана, являющегося одним из основных энергетических мировых ресурсов.

Одним из направлений в изучении гидратосодержащих пород является лабораторное изучение их акустических свойств. Это обусловлено тем, что наличие гидрата в породе существенно влияет на ее акустические

свойства (повышенные скорости распространения сейсмических волн и пониженное поглощение) [2]. В настоящее время можно выделить два основных подхода к изучению физических свойств гидратосодержащих пород. Первым подходом является извлечение реальных образцов из природного места скопления газовых гидратов и их дальнейшая транспортировка в лабораторию с поддержанием пластовых условий. Так, в работе [3] акустические свойства гидратосодержащих пород изучались на пробах, взятых из скважины Mallik 7 2L-38 на территории Канады. Данный подход требует значительных затрат на разработку и реализацию оборудования способного поддерживать первоначальные P–T условия при извлечении образца и его транспортировке. Наиболее широко применимым является другой подход, когда проводится формирование синтетических гидратосодержащих образцов и дальнейшее изучение их физических свойств в лабораторных условиях в специализированных установках [4].

Одной из основных задач акустических экспериментов является определение связей физических свойств с гидратонасыщением и другими параметрами образца для дальнейшего использования этих связей для калибровки имеющихся или создания новых теоретических моделей гидратосодержащих сред. Такие модели, в свою очередь, необходимы для разработки геофизических методов поиска и мониторинга процессов разработки природных скоплений газовых гидратов. В литературе предложен целый ряд эффективных акустических моделей, которые связывают скорости продольных (P) и поперечных (S) волн с количеством гидрата в поровом пространстве. Наиболее популярными являются эффективные модели, которые

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

†E-mail: dugarovga@ipgg.sbras.ru

‡E-mail: duchkovaa@ipgg.sbras.ru

устанавливают связь между скоростями P- и S- волн с гидратонасыщением с учетом морфологии гидрата в порах образца [5, 6].

На результаты акустических измерений могут влиять многие физические и химические процессы, т.к. сами эксперименты по формированию искусственных образцов являются длительными (от нескольких дней до недель). В ходе проведения экспериментов с неконсолированными песчаными образцами, содержащими лед, [7] была обнаружена температурная зависимость скоростей упругих волн, а также эффект падения скоростей со временем при постоянных P–T условиях. В данной работе экспериментально исследуется наличие этих эффектов в неконсолированных песчаных образцах, содержащих гидрат метана.

1. МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ОБРАЗЦОВ И ИЗУЧЕНИЯ ИХ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Для формирования гидратосодержащих пород предварительно подготавливался неконсолированный образец, состоящий из смеси кварцевого песка с дистиллированной водой. Размер фракции песка составлял 0.2–0.25 мм. Данная смесь помещалась в цилиндрическую ячейку, изготовленную из капролона. Высота ячейки составляет 40–50 мм, внешний диаметр — 30 мм, внутренний диаметр — 26.6 мм. Ячейка со смесью помещалась в камеру специализированной установки, которая позволяет создавать P–T условия, необходимые для формирования гидрата [8]. В камере устанавливалось боковое и осевое давление в 30 МПа, в камеру под давлением 10 МПа нагнетался метан и устанавливалась температура, соответствующая области стабильности гидрата метана.

Для проведения акустических измерений использовались датчики в виде шайб, изготовленных из пьезокерамики ЦТС-9. Использовались два типа пьезокерамических шайб с разной поляризацией, обеспечивающих генерацию и регистрацию P- и S- волн. Размер датчиков составлял 18 мм в диаметре и 2 мм толщиной. Датчики располагались в плунжерах, обеспечивающих осевое давление на образец. Генерация упругих волн производилась в импульсном режиме, а скорость упругих волн определялась из отношения длины образца к времени пробега волны по образцу [8].

Мониторинг процесса гидратообразования производился по измеренным значениям скоростей упругих волн. Акустические измерения проводились в автоматизированном режиме в ходе проведения всего эксперимента с периодичностью в 5 мин. Поскольку процесс формирования газогидрата метана в образце сопровождается увеличением скоростей упругих волн, выход значений скоростей на постоянные значения служил сигналом о завершении процесса формирования гидрата в образце.

В завершающей стадии акустических экспериментов проводилось разложение газогидрата в образце путем повышения температуры. Газовый контур при этом замкнут и позволяет отслеживать скачок давления при разложении гидрата с выделением метана. Измерив объем газа, соответствующий данному перепаду давления, определялась объемная доля гидрата в поровом пространстве образца (гидратонасыщение) до его разложения.

2. ПАДЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТЕЙ P- И S- ВОЛН В ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ОБРАЗЦАХ ПРИ ПОСТОЯННЫХ P–T УСЛОВИЯХ

В работе [7] авторы исследовали акустические свойства неконсолированных песчаных образцов, содержащих лед. Один из проведенных экспериментов заключался в изучении акустических свойств образца при постоянной внешней нагрузке. Было показано, что при осевой и боковой нагрузке в 30 МПа и постоянной температуре — 7°C происходит падение скоростей P- и S- волн. За 40 ч проведения эксперимента значение скоростей P- и S- волн упали на 10% и 9% соответственно. Авторы объяснили данный эффект частичным перераспределением кристаллов льда с контактов зерен песка в свободное поровое пространство образца, что приводит к уменьшению цементации образца и, соответственно, уменьшению скоростей.

Для проверки эффекта падения скоростей упругих волн в образце, содержащем газовый гидрат, был проведен аналогичный эксперимент. В камере установки было установлено газовое давление 10 МПа и температура 5°C. На образец оказывалось постоянное боковое и осевое давление в 30 МПа. Формирование гидрата в образце заняло 50 часов, индикатором завершения формирования гидрата служило прекращение роста скоростей (рис. 1). Далее образец при постоянных P–T условиях находился в камере в течение 75 ч. В период времен 50–125 ч наблюдается снижение скоростей P- и S- волн на 2% и 1% соответственно (52 и 8 м/с). В период времени 125–150 ч температура в камере была увеличена на 7°C в два этапа для приближения P–T условий к границе фазового равновесия гидрата метана. Предполагалось, что это может привести к ускорению процесса падения скоростей, но достичь этого не удалось. Далее в период времен 150–450 ч наблюдается падение скоростей P- и S- волн на 4% и 4% соответственно (130 и 86 м/с).

Таким образом при поддержании температуры в пределах стабильности гидрата метана, наблюдается постепенное падение скоростей, как и в случае с образцами, содержащими лед. За весь временной промежуток эксперимента (450 ч) значения скоростей продольных и поперечных волн уменьшились на 8% и 7% соответственно (283 и 155 м/с) от скоростей в момент окончания формирования гидрата в образце (момент прекращения роста скоростей). Из них на падение ско-

ростей при длительной выдержке при постоянных Р–Т условиях приходится 6% и 5% соответственно, оставшаяся часть связана с изменением температуры.

Наблюдаемый в данном эксперименте эффект можно также объяснить эффектом переформирования гидрата. В данной работе используемый метод подготовки образца приводит к формированию типа гидрата, который обволакивает песчаные гранулы [9]. Изначально гидрат может быть сформирован в энергетически невыгодных местах, но под действием механической нагрузки на скелет перераспределяется в свободное поровое пространство, что приводит к уменьшению цементации гранул и соответствующему падению скоростей упругих волн с течением времени.

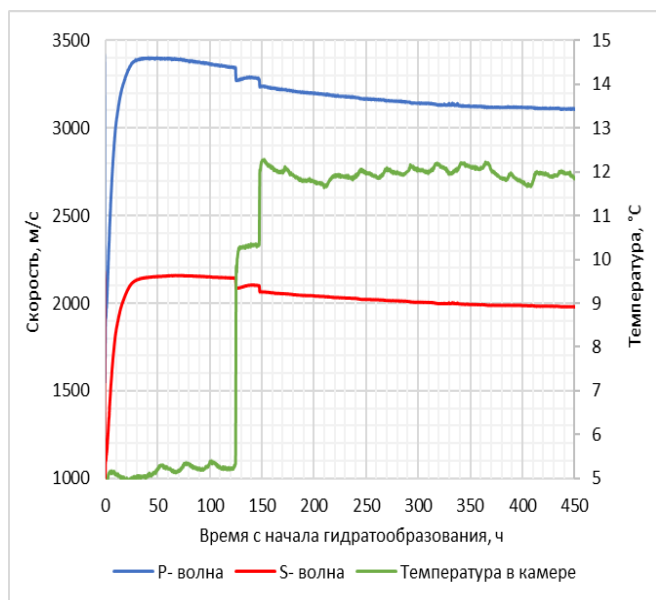


Рис. 1: Изменение скоростей Р- и S- волн в гидратосодержащем образце при длительной выдержке при постоянных Р–Т условиях

3. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТЕЙ Р- И S- ВОЛН В ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ ОБРАЗЦАХ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Наличие температурной зависимости скоростей упругих волн было обнаружено в работе [10], где авторами был проведен эксперимент по постепенному повышению температуры в камере в процессе измерения акустических свойств гидратосодержащего угольного образца. Также в предыдущем разделе при изменении температуры наблюдалось изменение скоростей Р- и S- волн, что также подтверждает наличие эффекта температурной зависимости (рис. 1). Для получения кривой зависимости скорости от температуры было дополнительно проведено линейное изменение ее значения в камере. Было проведено два цикла с изменением температуры в пределах стабильно-

сти гидрата метана (от -20°C до 10°C) (рис. 2). Таким образом оценивалось влияние скорости изменения температуры на получаемые зависимости. Различия в зависимостях для двух циклов получились несущественные, что говорит о возможности использования в дальнейших экспериментах температурных режимов с изменениями в $2^{\circ}\text{C}/\text{час}$, что соответствовало скорости изменения температуры в первом цикле на рис. 2. Зависимость для второго температурного цикла приведена на рис. 3.

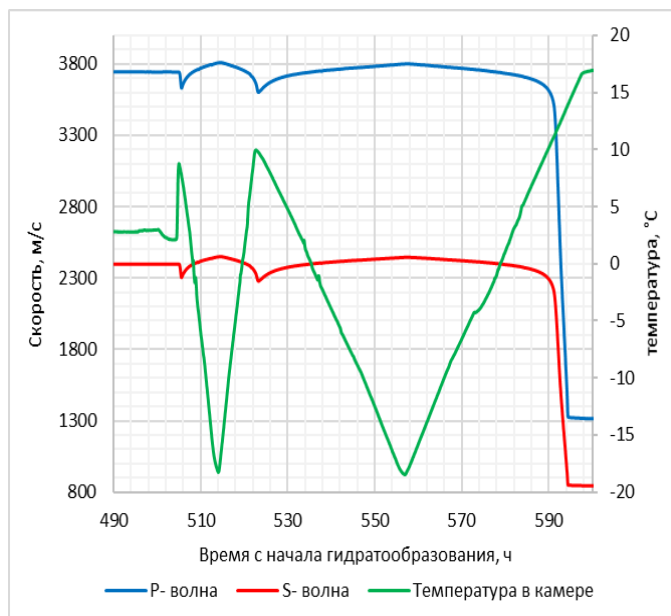


Рис. 2: Значения скоростей Р- и S- волн при циклическом изменении температуры в камере

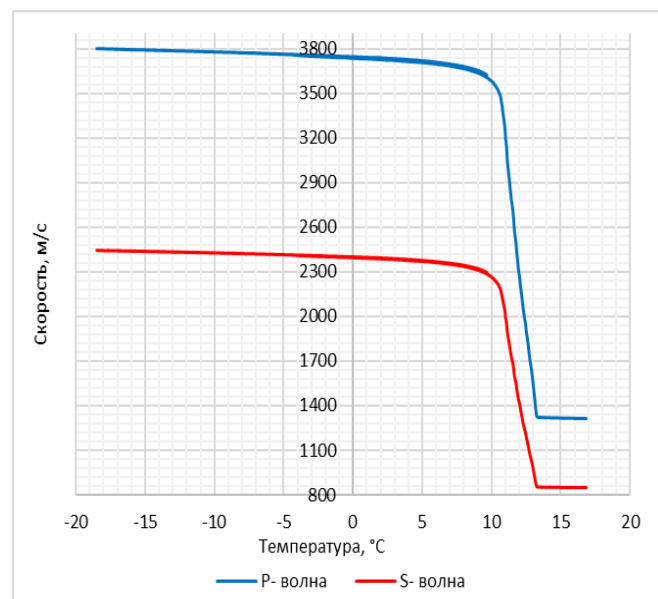


Рис. 3: Зависимость скоростей Р- и S- волн от температуры

С увеличением температуры наблюдается уменьшение значений скоростей Р- и S-волн. Чем ближе значение температуры приближаются к границе зоны стабильности гидрата, тем сильнее падают скорости. В конце второго цикла температура была повышена до 17°C, что выше области стабильности гидрата метана. В результате произошло разложение газогидрата в образце, что видно по резкому падению скоростей (рис. 2 и 3). Данный эксперимент показывает наличие температурной зависимости скоростей и в песчаных образцах, содержащих гидрат метана, помимо представленных ранее результатов для песчаных образцов, содержащих лед, [7], а также угольных образцов [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены результаты длительного эксперимента (600 ч) по изучению акустических свойств неконсолидированного песчаного образца, со-

державшего гидрат метана. Эксперимент был проведен в два этапа. На первом этапе было показано наличие эффекта падения скоростей в образце при постоянных термобарических условиях. За примерно 400 ч скорости продольных и поперечных волн упали на 6% и 5% соответственно. На втором этапе было показано изменение скоростей продольных и поперечных волн в неконсолидированном песчаном образце, содержащим газовый гидрат метана, при изменении температуры в камере. С увеличением температуры наблюдается уменьшение значений скоростей с усилением этого эффекта при приближении к границе зоны стабильности гидрата метана. Данные эффекты необходимо учитывать при планировании и проведении экспериментальных исследований физических свойств гидратосодержащих образцов, а также при интерпретации их результатов.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы фундаментальных исследований СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования».

-
- [1] *Истомин В. А.* Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992.
 - [2] *Riedel M., Willoughby E., Chopra S.* Geophysical characterization of gas hydrates. / Society of Exploration Geophysicists. 2010. **14**.
 - [3] *Winters W., Pecher I., Waite W., Mason D.* // American Mineralogist. 2004. **89**, N 8-9. P. 1221.
 - [4] *Waite W., Winters W., Mason D.* // American Mineralogist. 2004. **89**, N 8-9. P. 1202.
 - [5] *Dvorkin J., Nur A.* // Geophysics. 1996. **61**, N 5. P. 1363.
 - [6] *Dvorkin J., Helgerud M., Waite W., Kirby S., Nur A.* Introduction to physical properties and elasticity models. Natural Gas Hydrate. Springer, Dordrecht. 2000. P. 245-260.
 - [7] *Dugarov G., Duchkov A., Fokin M.* Laboratory study of the acoustic properties of sand samples containing ice. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing. 2018. **193**, N 1. P. 012020.
 - [8] *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.
 - [9] *Манаков А. Ю., Дучков А. Д.* // Геология и геофизика. 2017. **58**, №. 2. С. 290.
 - [10] *Дробчик А. Н., Дугаров Г. А., Дучков А. А.* Температурная зависимость скоростей продольных и поперечных волн в неконсолидированном угольном образце, содержащем гидрат метана. / Новые направления нефтегазовой геологии и геохимии. Развитие геологоразведочных работ. 2017. С. 109-116.

Experimental acoustic measurements on unconsolidated sandy samples containing methane hydrate

M. I. Fokin^{1, 2, a}, G. A. Dugarov^{1, b}, A. A. Duchkov^{1, 2, c}

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

²*Novosibirsk State University. Novosibirsk, 630090, Russia*

E-mail: ^afokinmi@ipgg.sbras.ru, ^bdugarovga@ipgg.sbras.ru, ^cduchkovaa@ipgg.sbras.ru

The paper discusses the results of a long experiment to study the acoustic properties of an unconsolidated sand sample containing methane hydrate. The experiment was consisted of two stages: maintaining constant thermobaric conditions corresponding to the stability of methane hydrate and linear temperature variations. As a result, two effects were found: a decrease in the velocities of both compressional and shear waves during long exposure of the hydrate-bearing sample, as well as the temperature dependence of the acoustic properties — velocities. The velocities decreased with temperature increasing. Near the stability boundary of methane hydrate the velocities decreasing is stronger. During long exposure of the sample for about 400 hours, the velocities of the compressional and shear waves dropped by 6% and 5%, respectively. These effects can have a significant impact on the interpretation of results of experiments with hydrate-bearing samples and should be taken into account.

PACS: 43.35.Cg

Keywords: gas hydrates, acoustic properties of hydrate-bearing medium, compressional and shear waves velocities, time dependence of velocities, temperature dependence of velocities.

Received 20 June 2019.

Сведения об авторах

1. Фокин Михаил Игоревич — мл. науч. сотрудник; e-mail: fokinmi@ipgg.sbras.ru.
 2. Дугаров Гэсэр Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: dugarovga@ipgg.sbras.ru.
 3. Дучков Антон Альбертович — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (383) 363-67-14, e-mail: duchkovaa@ipgg.sbras.ru.
-