



АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ПЕСЧАНЫХ ОБРАЗЦОВ, СОДЕРЖАЩИХ ГИДРАТ КСЕНОНА

А.Н. Дробчик¹, Г.А. Дугаров¹, А.А. Дучков^{1,2}, К.Э. Купер³

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, ул. Пирогова, 1, Россия

³Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 11, Россия
e-mail: DugarovGA@ipgg.sbras.ru

Дано описание новой разработанной камеры, позволяющей проводить одновременные акустические измерения и рентгеновскую томографию гидратосодержащих образцов. Приводятся результаты первых экспериментов по формированию гидрата ксенона в песчаном образце методом «с избытком газа». Формирование газогидрата в образце привело к характерному увеличению скоростей продольных волн, связанному с цементацией гранул гидратом. Полученные томографические изображения показали, что сформированный гидрат ксенона обволакивает гранулы песка. Также наблюдается равномерное распределение гидрата в поровом пространстве в области сканирования.

Газовые гидраты; гидрат ксенона; акустические свойства; рентгеновская синхротронная томография; экспериментальные исследования

ACOUSTIC MEASUREMENTS AND X-RAY TOMOGRAPHY OF SAND SAMPLES CONTAINING XENON HYDRATE

A.N. Drobchik¹, G.A. Dugarov¹, A.A. Duchkov^{1,2}, K.E. Kuper³

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia

³Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Lavrentiev Ave., 11, Novosibirsk, 630090, Russia
e-mail: DugarovGA@ipgg.sbras.ru

The work describes a new developed cell, which allows simultaneous acoustic measurements and X-ray tomography of hydrate-bearing samples. The results of the first experiments on the formation of xenon hydrate in a sand sample by the “excess gas” method are presented. The formation of gas hydrate in the sample led to compressional wave velocity increase associated with cementation of granules with hydrate. The obtained tomographic images showed that formed xenon hydrate envelops sand granules. A uniform distribution of hydrate in the pore space in the scan area is also observed.

Gas hydrates; xenon hydrate; acoustic properties; X-ray synchrotron tomography; experimental studies

ВВЕДЕНИЕ

Газовые гидраты представляют собой твердые кристаллические соединения воды и гидратообразующего газа, существующие при определенных термобарических условиях. Для их стабильности необходимо повышенное давление и низкая температура [Waite et al., 2009]. При диссоциации они разлагаются на воду и газ, для природных газогидратов это, в основном, метан. Газогидраты могут рассматриваться как перспективный источник природного газа [Chong et al., 2016], а также как источник потенциальных осложнений и аварий при бурении и разработке месторождений при наличии их скоплений в области работ [Макогон, Омельченко, 2012; Истомин и др., 2013].

Необходимость сохранения термобарических условий в области стабильности гидрата при извлечении реальных гидратосодержащих образцов приводит к сложности и высокой стоимости подобных работ. Поэтому в мировой практике физические свойства гидратосодержащих сред исследуется на специализированных установках, позволяющих формировать искусственные гидратосодержащие образцы и проводить измерения их свойств без извлечения [Winters et al., 2000; Kulenkampff, Spangenberg, 2005; Priegnitz et al., 2013]. Ранее на подобной установке нами был проведен существенный объем экспериментов по изучению акустических свойств гидратосодержащих образцов [Дучков и др., 2018, 2019; Dugarov et al., 2019].

Физические свойства гидратосодержащих образцов на макроуровне сильно зависят от их микроструктуры, включая состав матрицы, структуру порового пространства, морфологию гидратов и т. д. Поэтому весьма актуальной является задача объединения лабораторных экспериментов по формированию и изучению физических свойств гидратосодержащих образцов с получением изображений их внутренней структуры на разных масштабах. С целью получения таких изображений в течение последнего десятилетия активно развивается подход с применением рентгеновской томографии к изучению геоматериалов [Fusseis et al., 2014; Vultreys et al., 2016]. В данной работе рассматриваются результаты разработки специализированной камеры для совместного проведения высокоразрешающей томографической съемки и акустических измерений на гидратосодержащих образцах. Представлены результаты первых экспериментов, проведенных на песчаном образце, содержащем гидрат ксенона.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для совместного проведения акустических измерений и томографической съемки гидратосодержащих образцов была разработана новая камера из рентгенопрозрачного корпуса (РЕЕК) с заведенными пьезокерамическими датчиками, позволяющая создавать необходимые термобарические условия. Схема камеры с численными обозначениями различных ее элементов приведена на рис. 1, а.

Песчаный образец (1) размещается между двумя акустическими излучателями/приемниками (2), диаметром 9.5 мм, и обжимается манжетой из фторкаучука (Viton), см. рис. 1, б. Сборка из образца и датчиков помещается в рентгенопрозрачную втулку (3), которая затем заполняется маслом для создания обжимного давления. Размещение сборки вдоль оси трубки осуществляется с помощью конуса на корпусе верхнего датчика. Герметизация камеры и прижим датчика выполняются кольцевым уплотнением с накидной гайкой (4).

В верхнем датчике просверлен газовый канал (5) для подвода газа гидратообразователя через вваренный стальной капилляр. Рентгенопрозрачная часть корпуса ввинчивается в стальную опорную втулку (6) с каналом для подачи масла (7) и проходником высокого давления (8). Электрические

соединения сверху выводятся через проклеенный канал верхнего датчика, а для нижнего датчика выводятся через проходник снизу.

Корпус камеры через платформу (9) закрепляется на поворотном основании для получения проекций образца в диапазоне от 0° до 180° . В качестве источника рентгеновского излучения используется синхротронное излучение, что позволяет получать изображения с высоким разрешением за небольшие промежутки времени (десятки минут). Источником синхротронного излучения служил канал вывода «Рентгеновская микротомография и микроскопия», расположенный на ускорителе заряженных частиц ВЭПП-3 Института ядерной физики СО РАН. Съемка осуществлялась в угловом диапазоне от 0° до 180° с шагом 0.075° , всего 2400 проекций на одно изображение. Время экспозиции одной проекции составляло 0.4 с. Сканировалась лишь центральная часть образца диаметром 3 мм для повышения пространственного разрешения получаемых изображений. В данном случае разрешение составило порядка 5 мкм.

В качестве охлаждающей установки использовался Cryostream 700 от «Oxford Cryosystems». Для концентрации потока от генератора сухого холодного воздуха поверх камеры установлен тубус из полиимида с текстолитовой основой, см. рис. 1, в. Для контроля температуры образца использовались показания терморезистора, заведенного через проходник (8) внутрь камеры высокого давления (3) и расположенного в масле для создания обжимного давления.

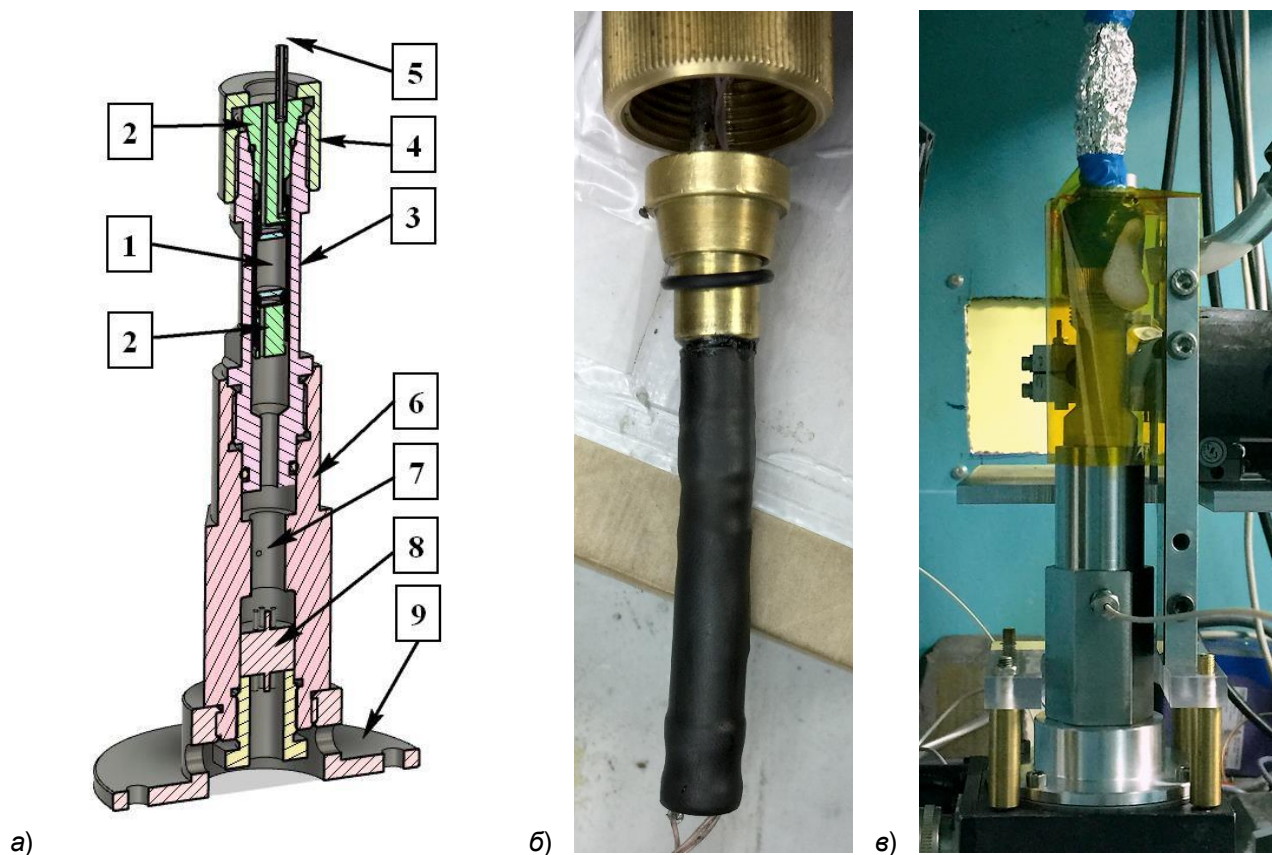


Рис. 1. Схема камеры (а); фотография подготовленного образца с акустическими датчиками, обтянутыми манжетой, (б) и фотография камеры (в), подготовленной для проведения акустических и томографических измерений

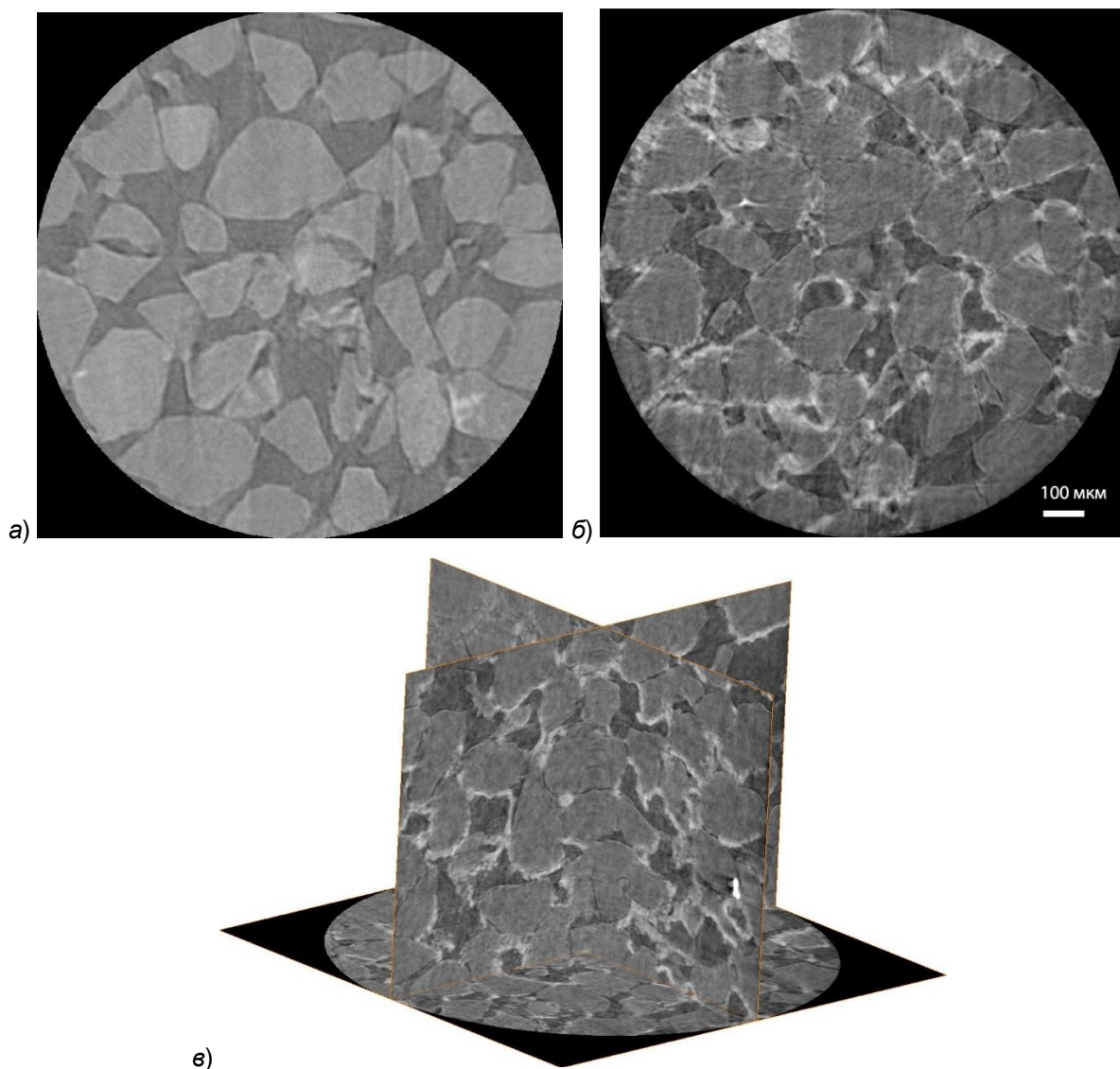


Рис. 2. Срез томографического изображения образца до (а) и после наработки гидрата ксенона (б), а также срезы трехмерного изображения гидратосодержащего образца (в). Светлые участки соответствуют гидрату ксенона, серый цвет – песку, темно-серый – газу

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для изготовления образцов использовалась смесь кварцевого песка и водного 5 % раствора йодистого калия, для повышения контрастности содержащегося в образце флюида. Подготовленный образец с датчиками помещался в камеру, в которой с целью обеспечения хорошего акустического контакта создавалось и поддерживалось на уровне 2.5 МПа всестороннее обжимное масляное давление. Для формирования гидрата в образце использовался ксенон. Газ задавливался в образец после установления обжимного давления во избежание прорыва манжеты.

Данный метод формирования гидратосодержащего образца принято называть методом «с избытком газа». Также существует метод «с избытком воды», при котором в образец, уже содержащий ограниченный объем гидратообразующего газа, задавливается вода. Использование различных методик формирования гидратосодержащих образцов приводит к наработке в поровом пространстве гидрата с различной морфологией [Dugarov et al., 2019].

Для предотвращения выдавливания воды из образца газ подавался после предварительной его заморозки. Исходное газовое давление составляло 1.3 МПа. Формирование гидрата ксенона происходило при температуре порядка 1 °С.

Томографическая съемка проводилась на образце до наработки гидрата ксенона (см. рис. 3, а), а также после его формирования в течение 12 часов (см. рис. 3, б). Полученные 3D изображения показали равномерное распределение гидрата в поровом пространстве в области сканирования (рис. 3, в). Вследствие температурных деформаций корпуса камеры (компонент 4 на рис. 1, а) в процессе съемки наблюдался небольшой сдвиг верхнего датчика (верхний компонент 2 на рис. 1, а), к которому прикреплен сам образец. Вследствие этого возникало отклонение образца от вертикали, что, в свою очередь, привело к смещению сечений образца. На рис. 3, а, б видна неидентичность сечений. Избавление от наблюдаемого отклонения образца требует дальнейшей доработки камеры

После наработки гидрата ксенона скорость продольной (Р) волны в образце увеличилась с 1.48 км/с до 2.54 км/с. На полученных изображениях видно, что сформированный гидрат ксенона обволакивает гранулы песка, цементируя их между собой. Это соответствует представленным в литературе изображениям песчаных образцов, также содержащих гидрат ксенона [Jin et al., 2014; Chaouachi et al., 2015; Sell et al., 2016]. При этом полученные 3D изображения показали неравномерное распределение гидрата в поровом пространстве в области сканирования (рис. 3, в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты первых экспериментальных исследований песчаных образцов, содержащих гидрат ксенона, с одновременным проведением акустических измерений и рентгеновской томографии. Для проведения данных работ была разработана новая камера с рентгенопрозрачным корпусом и пьезокерамическими датчиками, которая позволяет создавать необходимые термобарические условия для наработки газового гидрата. Гидрат ксенона в песчаном образце формировался методом «с избытком газа». При этом наблюдалось характерное увеличение скоростей продольных волн, связанное с цементацией гранул гидратом. Полученные томографические изображения показали, что сформированный гидрат ксенона обволакивает гранулы песка. Также было показано, что в области томографической съемки гидрат был распределен в поровом пространстве равномерно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-32-00647.

ЛИТЕРАТУРА

Дучков А.Д., Дугаров Г.А., Дучков А.А., Дробчик А.Н. Лабораторные исследования скорости и поглощения ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду/лед, гидраты метана и тетрагидрофурана // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60, № 2. – С. 230–242.

Дучков А.Д., Дучков А.А., Дугаров Г.А., Дробчик А.Н. Скорости ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду, лед или гидраты метана и тетрагидрофурана (лабораторные измерения) // Доклады академии наук. – 2018. – Т. 478, № 1. – С. 94–99.

Истомин В.А., Моисейкин П.А., Абрашов В.Н., Федулов Д.М., Черных В.В., Медведев С.Г., Сопнев Т.В. Гидратообразование в призабойной зоне пласта при освоении туронских залежей Западной Сибири // Вести газовой науки. – 2013. – № 5. – С. 99–104.

Макогон Ю.Ф., Омельченко Р.Ю. Мессояха – газогидратная залежь, роль и значение // Геология и полезные ископаемые мирового океана. – 2012. – № 3. – С. 5–19.

Bultreys T., De Boever W., Cnudde V. Imaging and image-based fluid transport modeling at the pore scale in geological materials: A practical introduction to the current state-of-the-art // Earth-Science Reviews. – 2016. – Vol. 155. – P. 93–128.

Chaouachi M., Falenty A., Sell K., Enzmann F., Kersten M., Haberthür D., Kuhs W.F. Microstructural evolution of gas hydrates in sedimentary matrices observed with synchrotron X-ray computed tomographic microscopy // Geochemistry. Geophysics. Geosystems. – 2015. – Vol. 16. – P. 1711–1722.

Chong Z.R., Yang S.H.B., Babu P., Linga P., Li X.-S. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges // Applied Energy. – 2016. – Vol. 162. – P. 1633–1652.

Dugarov G.A., Duchkov A.A., Duchkov A.D., Drobchik A.N. Laboratory validation of effective acoustic velocity models for samples bearing hydrates of different type // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2019. – Vol. 63. – P. 38–46.

Fusseis F., Xiao X., Schrank C., De Carlo F. A brief guide to synchrotron radiation-based microtomography in (structural) geology and rock mechanics // Journal of Structural Geology. – 2014. – Vol. 65. – P. 1–16.

Jin Y., Konno Y., Nagao J. Pressurized subsampling system for pressurized gashydrate-bearing sediment: microscale imaging using X-ray computed tomography // Review of Scientific Instruments. – 2014. – Vol. 85. – 094502.

Kulenkampff J., Spangenberg E. Physical properties of cores from the Mallik 5L-38 gas hydrate production research well under simulated in situ conditions using the Field Laboratory Experimental Core Analysis System (FLECAS) // Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada / Eds. S.R. Dallimore, T.S. Collett – Geological Survey of Canada, 2005. – Bulletin 585. – 16 p. <https://doi.org/10.4095/220734>

Priegnitz M., Thaler J., Spangenberg E., Rücker C., Schicks J.M. A cylindrical electrical resistivity tomography array for three-dimensional monitoring of hydrate formation and dissociation // Review of Scientific Instruments. – 2013. – Vol. 84. – 104502.

Sell K., Saenger E.H., Falenty A., Chaouachi M., Haberthür D., Enzmann F., Kuhs W.F., Kersten M. On the path to the digital rock physics of gas hydrate-bearing sediments – processing of in situ synchrotron-tomography data // Solid Earth. – 2016. – Vol. 7. – P. 1243–1258.

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., Soga K., Winters W.J., Yun T.-S. Physical properties of hydrate-bearing sediments // Review of Geophysics. – 2009. – Vol. 47. – RG4003.

Winters W.J., Dillon W.P., Pecher I.A., Mason D.H. GHASTLI – determining physical properties of sediment containing natural and laboratory-formed gas hydrate // Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments. – Springer, 2000. – P. 311–322.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ДРОБЧИК Аркадий Николаевич – научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: экспериментальные исследования, автоматизация исследований, разработка специализированных установок, акустические измерения.

ДУГАРОВ Гэсэр Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: теория распространения сейсмических волн в анизотропных и поглощающих средах, эффективные модели, акустические свойства гидратосодержащих образцов.

ДУЧКОВ Антон Альбертович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: геометрическая теория построения сейсмических изображений, параллельные алгоритмы обработки сейсмических данных, микросейсмический мониторинг в разведочных задачах, лабораторное изучение физических свойств пород, содержащих газогидраты.

КУПЕР Константин Эдуардович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Область научных интересов: рентгеновская компьютерная томография, микроструктура горных пород.