

## **ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГИДРАТОСОДЕРЖАЩИХ И МЕРЗЛЫХ ПОРОД\***

### ***Альберт Дмитриевич Дучков***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

### ***Никита Александрович Голиков***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)333-31-38, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

### ***Антон Альбертович Дучков***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)333-34-18, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

### ***Андрей Юрьевич Манаков***

Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 3, доктор химических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)316-53-46, e-mail: manakov@niic.nsc.ru

### ***Михаил Евгеньевич Пермяков***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, и.о. заведующего лабораторией, тел. (383)330-25-91, e-mail: PermyakovME@ipgg.sbras.ru

### ***Аркадий Николаевич Дробчик***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383) 333-14-18, e-mail: DrobchikAN@ipgg.sbras.ru

Сконструирована и изготовлена аппаратура, позволяющая в лабораторных условиях моделировать гидратосодержащие искусственные образцы и измерять их акустические свойства (скорости волн, их поглощение/затухание). Проведена серия успешных тестовых экспериментов по формированию образцов, содержащих гидраты метана, и по измерению скоростей акустических волн в консолидированных (оргстекло, песчаник) и неконсолидированных (кварцевый песок) образцах при разных давлениях и температурах.

**Ключевые слова:** гидраты метана, гидратосодержащие и мерзлые породы, акустические свойства пород, аппаратура для моделирования гидратосодержащих образцов и измерения их акустических свойств.

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-14-00511) в ИНГГ и ИНХ СО РАН.

## LABORATORY SETTING FOR THE STUDY OF ACOUSTIC PROPERTIES OF GAS HYDRATE-BEARING AND FROZEN ROCKS

### *Albert D. Duchkov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Principal Scientist, tel. (383)330-25-91, e-mail: DuchkovAD@ipgg.sbras.ru

### *Nikita A. Golikov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Scientist, tel. (383)333-31-38, e-mail: GolikovNA@ipgg.sbras.ru

### *Anton A. Duchkov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the Laboratory, tel. (383)333-34-18, e-mail: DuchkovAA@ipgg.sbras.ru

### *Andrei Yu. Manakov*

Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Lavrentiev Prospect, Doctor of Science, Head of the Laboratory, tel. (383)316-53-46, e-mail: manakov@niic.nsc.ru

### *Mikhail E. Permyakov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Head of the Laboratory, tel. (383)330-25-91, e-mail: PermyakovME@ipgg.sbras.ru

### *Arkadii N. Drobchik*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Koptuyug Prospect, 3, Junior Researcher, tel. (383)333-14-18, e-mail: DrobchikAN@ipgg.sbras.ru

Equipment, allowing in laboratory the hydrate-bearing samples simulation and measuring their acoustic properties (velocity of the waves, their absorption/attenuation) have been designed and manufactured. A series of successful test experiments of the hydrate-bearing samples simulation and measuring of the acoustic waves velocity in the consolidated (plexiglas, sandstone) and unconsolidated (quartz sand) samples at different pressures and temperatures was carried out.

**Key words:** methane hydrates, hydrate-bearing and frozen rocks, acoustic properties of rocks, equipment for simulating hydrate-bearing samples and measuring their acoustic properties.

Сведения о физических свойствах горных пород, содержащих газы гидраты, необходимы для калибровки дистанционных геофизических методов (главным образом, сейсмических и электромагнитных) поисков и разведки скоплений газогидратов в донных осадках глубоких водоемов и в мерзлых породах криолитозоны. Обычно физические свойства гидратосодержащих пород изучаются в лабораторных условиях. За границей основное внимание уделяется акустическим свойствам, т. к. именно сейсмические методы в основном применяются при поисках и разведке скоплений газовых гидратов в морских осадках [1–3]. В России только в последнее десятилетие геологическими мето-

дами (подводное бурение, пробоотбор грунтовыми трубками) выявлено более 50 скоплений гидратов метана в поддонных осадках оз. Байкал [4] и Охотского моря [5]. Несомненно, что в ближайшие годы будут обнаружены гидратные месторождения в арктических окраинных морях. Весьма вероятно наличие реликтовых скоплений гидратов метана в криолитозоне Сибири [6]. Для поисков и оконтуривания гидратных тел в этих районах целесообразно использовать сейсмические методы, что, однако, требует предварительного изучения акустических свойств пород. Такая задача была поставлена в 2014 г. перед авторским коллективом. В итоге нами сконструирована и построена лабораторная установка, позволяющая моделировать гидратосодержащие образцы и измерять их акустические свойства (скорости продольных и поперечных волн). Аппаратура и результаты тестовых экспериментов описаны в данной статье. Схема установки показана на рис. 1.

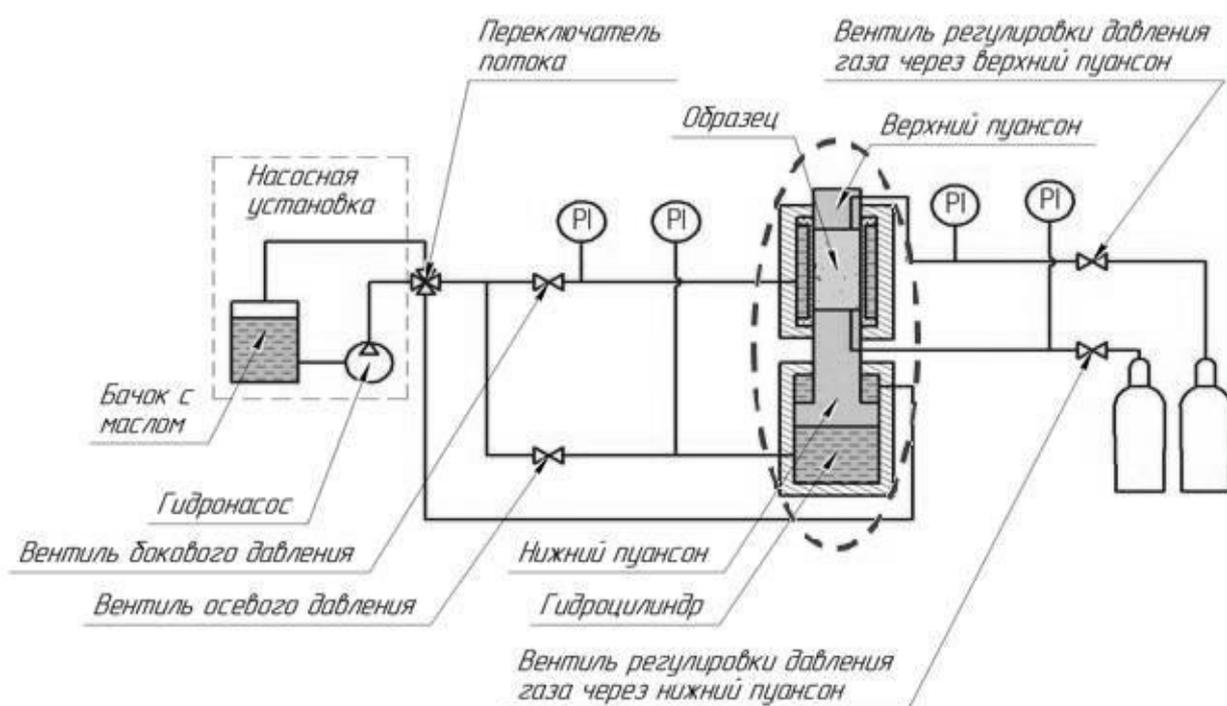


Рис. 1. Принципиальная схема установки  
(пунктирным овалом отмечена камера высокого давления)

Основным узлом установки является камера высокого давления, в которой размещается исследуемый образец. Установка включает также блоки создания внешнего (осевого и бокового) давления на образец (насосная установка, переключатель потока, вентили, манометры), доставки газа/жидкости в образец, термостатирования и измерительную систему, предназначенную для возбуждения и приема акустических волн. Камера состоит из стального цилиндра с внутренней резиновой манжетой и двух пуансонов с акустическими датчиками. Размеры камеры позволяют работать с образцами диаметром 30 мм

и высотой 10–50 мм. Камера рассчитана на максимальное давление 45 МПа. Источником давления в магистрали служит насосная установка. Для охлаждения камеры до температуры, необходимой для образования в образце гидратов или льда, используется термостат Huber Ministat. Измерительная система установки состоит из генератора высоковольтных импульсов АКПП-3305, цифрового осциллографа АКПП-72208А, излучателя и приемника ультразвуковых импульсов. Последние имеют одинаковую конструкцию и вмонтированы в верхний и нижний пуансоны. Датчики продольных (Р) волн сделаны из дисков пьезокерамики ЦТС-9 диаметром 18 мм и толщиной 2 мм, поляризованной по толщине диска, датчики поперечных (S) волн – из дисков, поляризованных по диаметру.

Основными измеряемыми акустическими параметрами являются скорости Р и S волн. Источник ультразвуковых волн (генератор АКПП-3305) генерирует в излучателе прямоугольный импульс длительностью 1 мкс и амплитудой 150 В, который после прохождения образца фиксируется приемником и поступает на один из каналов (В) цифрового осциллографа. Одновременно генератор вырабатывает синхроимпульс, который подается на другой канал (А) и служит точкой отсчета при измерениях времени прихода волны. Такая методика позволяет избежать ошибок, связанных с возможной нестабильностью синхронизации осциллографа. Частота дискретизации сигнала 250 МГц, т. е. шаг записи равен 4 нсек. Скорости Р- и S-волн рассчитываются по формуле:  $V = L / (t_u - t_3)$ , где  $L$  – длина образца,  $t_u$  – время прихода ультразвукового импульса в приемник,  $t_3$  – время задержки импульса в акустическом тракте «источник - приемник». Для нашей установки  $t_3^P = 5.04$  мкс для Р-волны и  $t_3^S = 8.68$  мкс для S-волны.

Для проверки работоспособности установки выполнены тестовые измерения скоростей прохождения акустических волн через консолидированные образцы (оргстекло и кварцевый песчаник) и образцы кварцевого песка (сухого, влажного, замороженного и содержащего гидраты).

Первым объектом измерений был эталонный образец из оргстекла. Измерения проводились при внешнем давлении 5 МПа и комнатной температуре. Получены значения скоростей  $V_p = 2704$  м/с,  $V_s = 1373$  м/с, которые практически совпадали со справочными данными ( $V_p = 2724$  м/с и  $V_s = 1365$  м/с). Более высокие значения скоростей получены при тестовых измерениях образца сцементированного мелкозернистого песчаника, отобранного с глубины 2700 м из пласта одного из нефтяных месторождений Западной Сибири. В данном случае измерения акустических скоростей проводились при комнатной температуре и внешнем давлении 5, 10 и 15 МПа. Зафиксирован заметный (в пределах 10 %) рост скоростей  $V_p$  (от 4133 до 4511 м/с) и  $V_s$  (от 2607 до 2941 м/с) при увеличении давления от 5 до 15 МПа. При давлении 15 МПа значения скоростей оказались практически идентичными (различие не более 1 %) полученным ранее на другой установке.

С наихудшими условиями для возбуждения акустического сигнала пришлось столкнуться в процессе измерений образцов сухого кварцевого песка при

температуре 15<sup>0</sup>С и давлении 5, 10, 15 МПа. Удалось отчетливо зафиксировать влияние внешнего давления на форму импульса и скорости распространения Р- и S-волн в сухом песке. Скорость Р-волны заметно изменяется (от 1069 до 1410 м/с) при увеличении давления от 5 до 15 МПа. Скорость S-волны стабилизируется на уровне 799–868 м/с при давлении более 10 МПа. Эксперименты с сухим песком позволили определить минимальное давление (10–15 МПа) обжата, которое обеспечивает необходимое сцепление датчиков с неконсолидированными образцами.

Мокрый песок измерялся при температурах 15<sup>0</sup>С и -7<sup>0</sup>С и при давлениях 5, 10 и 15 МПа. При положительных температурах насыщение песка водой не сказывалось заметно на скорости прохождения акустического сигнала. При замерзании воды скорости акустических волн резко увеличивались (примерно до уровня скоростей в образце консолидированного песчаника) и практически не изменялись с ростом давления. На записях хорошо заметно увеличение амплитуды сигнала при замерзании песка, что свидетельствует о повышении добротности образца. На записях Р-волны также фиксировался длинный цуг реверберационных помех (переотражения, резонансы и т.д. от всех границ как внутри датчиков, так и внутри установки).

Выполнено несколько успешных экспериментов по формированию песчаных образцов, содержащих гидраты метана. Для наработки метангидрата влажный песчаный образец подвергался многократным (4 цикла) изменениям температуры образца от 2 до -8<sup>0</sup>С и одновременно «промывался» метаном под давлением 8 МПа. Акустические измерения проводились после каждого цикла «замерзания-оттаивания».

В результате выполненных исследований сконструирована и изготовлена установка, предназначенная для моделирования гидратосодержащих образцов и измерения их акустических свойств. Проведено тестирование основных блоков установки (системы герметизации, давления, термостатирования, измерительной системы) в серии экспериментов по измерению скоростей акустических волн в консолидированных (оргстекло, песчаник) и неконсолидированных (песок) образцах при разных давлениях и температурах. Тестовые эксперименты показали пригодность установки для формирования синтетических образцов, содержащих газы гидраты, а также измерения акустических свойств гидратосодержащих и мерзлых образцов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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., Winter W.J., Yun T.-S. Physical properties of hydrate-bearing sediments // *Reviews of Geophysics*. – 2009. - 47, RG4003. - P. 1–38.
2. Gabitto J.F., Tsouris C. Physical properties of gas hydrates: A review // *Journal of Thermodynamics*, vol. 2010, article ID 271291, 12 pages, doi:10.1155/2010/271291
3. Riedel M., Willoughby E.C., Chopra S. (Eds.). *Geophysical characterization of gas hydrates* (SEG geophysical developments series; no. 14). Tulsa: Society of exploration geophysicists. - 2010. - 390 p.

4. Хлыстов О.М. Новые находки газовых гидратов в донных осадках озера Байкал // Геология и геофизика. - 2006. - Т. 47, № 8. - С. 979–981.
5. Обжиров А.И., Коровицкая Е.В., Пестрикова Н.Л., Телегин Ю.А. Нефтегазоносность и газогидраты в охотском море // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 2 (14). – С. 55–62.
6. Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. – М.: ВНИИГАЗ, 2009. – 192 с.

*© А. Д. Дучков, Н. А. Голиков, А. А. Дучков, А. Ю. Манаков,  
М. Е. Пермяков, А. Н. Дробчик, 2015*