

DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-2-7

ОБ УПРУГИХ СВОЙСТВАХ ПОРИСТЫХ СРЕД С ГАЗОВЫМИ ГИДРАТАМИ**А. А. Губайдуллин^{1,2,a}, О. Ю. Болдырева^{1,b}, Д. Н. Дудко^{1,b}**¹ Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация² Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Российская Федерация^a ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6231-6508>, A.A.Gubaidullin@yandex.ru^b timms@ikz.ru

Аннотация: проведен анализ современного состояния экспериментальных и теоретических исследований упругих свойств гидратосодержащих пористых сред. Сделан вывод о том, что во всех экспериментах установлена связь скоростей упругих волн с содержанием гидрата в поровом пространстве, а именно, наблюдается рост скоростей с увеличением гидратонасыщенности. В области теоретических исследований созданы математические модели упругих модулей гидратосодержащих пористых сред, позволяющие качественно и количественно описать результаты лабораторных опытов.

Ключевые слова: пористая среда, гидрат, упругие волны, скорость.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Тюменской области в рамках научного проекта № 20-41-720003.

Для цитирования: Губайдуллин А. А., Болдырева О. Ю., Дудко Д. Н. Об упругих свойствах пористых сред с газовыми гидратами. *Успехи кибернетики*. 2021;2(2):82–89. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-2-7.

ELASTIC PROPERTIES OF POROUS MEDIA CONTAINING GAS HYDRATES**Amir A. Gubaidullin^{1,2,a}, Olga Yu. Boldyreva^{1,b}, Dina N. Dudko^{1,b}**¹ *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Tyumen Branch, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation*² *University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation*^a ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6231-6508>, A.A.Gubaidullin@yandex.ru^b timms@ikz.ru

Abstract: the state-of-the-art experimental and theoretical studies of the elastic properties of porous media containing gas hydrate was analyzed. It is concluded that all the experiments identified a relationship between the elastic wave velocities and the hydrate content in the porous space: the velocities increase with higher hydrate saturation. The theoretical research produced simulation models for estimating the modulus of elasticity of hydrate-containing porous media to qualitatively and quantitatively describe the results of laboratory experiments.

Keywords: porous medium, hydrate, elastic waves, velocity.

Acknowledgements: the research was supported by the RFBR and the Tyumen Region, project No. 20-41-720003.

Cite this article: Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Yu., Dudko D. N. Elastic Properties of Porous Media Containing Gas Hydrates. *Russian Journal of Cybernetics*. 2021;2(2):82–89. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-2-7.

Введение

Природный газ из залежей газовых гидратов в будущем может стать основным источником энергии, так как его разведанные запасы многократно превышают запасы газовых месторождений. Газогидрат представляет собой твердое вещество, похожее на спрессованный снег или лед. Он имеет клатратную структуру и является соединением воды и газа. Механические свойства гидрата (плотность, скорость звука, модули упругости) близки к свойствам льда. Природные газогидраты на 98 % состоят из метангидратов. Одними из основных методов поиска месторождений газовых гидратов являются сейсморазведка и акустический каротаж. Это, в свою очередь, обуславливает актуальность

исследований упругих характеристик газогидратных пластов, скоростей распространения продольных и поперечных волн в горных породах и осадках, содержащих газогидрат. В природе газовый гидрат встречается в вечномерзлых породах, но чаще — в глубоководных донных осадках, когда температура и давление соответствуют условиям образования гидрата. В России известны залежи гидратов в осадках территориальных вод морей и озера Байкал. В 60-е годы прошлого столетия были обнаружены месторождения гидратов в зоне вечной мерзлоты на севере СССР. Производилась опытная добыча газа на Мессояхском месторождении. Гидраты могут иметь различную морфологию: форму массивных слоев, прожилок или отдельных вкраплений. Гидратный пласт может подстилаться проницаемым пластом с подвижным газом или водой или быть изолированным. В порах гидратного пласта могут находиться гидрат и газ или вода (лед). Накопленные к настоящему времени данные наблюдений и лабораторных исследований по образованию/разложению гидратов, использование компьютерной томографии, магнитного резонанса позволяет описать и классифицировать структуру порового пространства гидратосодержащих отложений в зависимости от условий образования гидрата. Если гидрат образовался при небольшом начальном содержании воды и избытке свободного газа, то он располагается вокруг контактов зерен осадка или обволакивает эти зерна, тем самым увеличивая жесткость скелета осадка (цементация). Другой крайний случай – образование гидрата из газа, растворенного в заполняющей поры воде. В этом случае частицы гидрата могут плавать в поровой жидкости либо при достаточном количестве газа касаться стенок пор и брать на себя часть нагрузки на скелет, изменяя тем самым упругие характеристики пласта. В случае, когда начальная насыщенность пор водой имеет промежуточные значения, возможна комбинация описанных вариантов. Таким образом, упругие характеристики гидратного пласта зависят от насыщенности пор гидратом, и установление таких зависимостей является актуальной и значимой задачей. Решение такой задачи необходимо для решения обратных задач по разведке и оценке запасов месторождений природных газовых гидратов.

Для развития волновой динамики пористой среды с газовым гидратом необходимо построение математических моделей трехфазных сред, учитывающих несовпадение напряжений, скоростей, в общем случае — температур фаз. Такие модели необходимы для адекватного описания скоростей и затухания продольных и поперечных волн, их отражения и прохождения через границы между различными слоями пористой среды, отражения от преград и т.п. Уравнение состояния пористой среды содержит в качестве параметров упругие модули. Вообще говоря, они неизвестны. При наличии конкретного образца горной породы их можно определить в лабораторном опыте, например, путем измерения скоростей продольной и поперечной волн. Однако более предпочтительным является построение математических моделей упругих модулей как функций, зависящих в том числе от упругих модулей фаз пористой среды: минералов, из которых состоит скелет, поровой жидкости и газа, газового гидрата, для которых имеются табличные значения.

Модели упругих модулей

Рассмотрим модели, построенные ранее разными авторами, определяющие упругие модули пористой гидратосодержащей среды в описанных выше случаях образования гидрата: частицы гидрата несут нагрузку на скелет вместе с зёрнами скелета (*load-bearing model*), гидрат образован на контактах зерен (*contact-cementing model*) или обволакивает зёрна скелета (*envelope-cementing model*). Во всех этих случаях скелет среды можно рассматривать составленным из зерен породы и гидрата, то есть двухфазным. Ранее для определения модулей упругости сред с двухфазным скелетом были предложены две гипотезы: об однородности деформаций [1] и однородности напряжений [2] фаз. Эти предположения позволяют получить следующие формулы для эффективных модулей упругости (далее K — объемный упругий модуль всестороннего сжатия, G — модуль сдвига, α_1 , α_2 — объемные доли фаз в скелете) через модули упругости фаз:

$$K_V = \alpha_1 K_1 + \alpha_2 K_2,$$

$$G_V = \alpha_1 G_1 + \alpha_2 G_2$$

при однородных деформациях,

$$\frac{1}{K_R} = \frac{\alpha_1}{K_1} + \frac{\alpha_2}{K_2},$$

$$\frac{1}{G_R} = \frac{\alpha_1}{G_1} + \frac{\alpha_2}{G_2}$$

при однородных напряжениях.

Позднее в работе [3] показано, что для изотропных поликристаллических сред объемный и сдвиговый модули упругости принимают промежуточные значения между K_V , K_R и G_V , G_R .

В работе [4] предложено вычислять объемный и сдвиговый модули упругости исходя из минерального состава скелета из m составляющих как среднее арифметическое значений, вычисленных согласно гипотезам Voigt W. [1] и Reuss A. [2]:

$$K = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^m \alpha_i K_i + \left(\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{K_i} \right)^{-1} \right],$$

$$G = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^m \alpha_i G_i + \left(\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{G_i} \right)^{-1} \right].$$

Эти идеи были использованы в работах по построению моделей упругих модулей пористой гидратосодержащей среды.

1. Частицы гидрата несут нагрузку на скелет вместе с зёрнами породы (*load-bearing model*).

В работе [5] предложены следующие формулы для вычисления упругих модулей гидратосодержащих насыщенных газом осадочных пород:

$$K_{LB} = \left[\frac{\phi/\phi_0}{K_{HM} + \frac{4}{3}G_{HM}} + \frac{1-\phi/\phi_0}{K + \frac{4}{3}G_{HM}} \right]^{-1} - \frac{4}{3}G_{HM},$$

$$G_{LB} = \left[\frac{\phi/\phi_0}{G_{HM} + D} + \frac{1-\phi/\phi_0}{G + D} \right]^{-1} - D,$$

$$D = \frac{G_{HM}}{6} \left(\frac{9K_{HM} + 8G_{HM}}{K_{HM} + 2G_{HM}} \right).$$

Здесь K , G – модули упругости породы, ϕ_0 – начальная (до гидратообразования) пористость, $\phi = \phi_0(1 - s_h)$, где s_h – гидратонасыщенность. K_{HM} , G_{HM} – модули упругости упаковки сферических частиц, которые вычисляются согласно контактной теории Hertz-Mindlin [6]:

$$K_{HM} = \left[\frac{n^2(1-\phi_0)^2 G^2}{18\pi^2(1-\nu)^2} P \right]^{1/3},$$

$$G_{HM} = \frac{5-4\nu}{5(2-\nu)} \left[\frac{3n^2(1-\phi_0)^2 G^2}{2\pi^2(1-\nu)^2} P \right]^{1/3}.$$

Здесь P – эффективное давление, ν – коэффициент Пуассона породы, n – среднее число контактов частицы с соседними частицами.

2. Гидрат образован на контактах зёрен (*contact-cementing model*) или обволакивает зёрна скелета (*envelope-cementing model*).

Для насыщенной газом среды из одинаковых шариков, цементированных гидратом, предложено рассчитывать эффективные упругие модули следующим образом [5]:

$$K_C(\alpha) = \frac{n(1-\phi)}{6} \left(K_h + \frac{4}{3}G_h \right) S_n(\alpha),$$

$$G_C(\alpha) = \frac{K_C(\alpha)}{5} + \frac{3n(1-\phi)}{20} G_h S_\tau(\alpha),$$

$$S_n(\alpha) = A_n \alpha^2 + B_n \alpha + C_n,$$

$$\begin{aligned}
 A_n &= -0.024153 \cdot D_n^{-1.3646}, \quad B_n = 0.20405 \cdot D_n^{-0.89008}, \\
 C_n &= 0.00024649 \cdot D_n^{-1.9864}, \quad D_n = \frac{2G_H (1 - \nu) (1 - \nu_H)}{\pi G (1 - 2\nu)}, \\
 S_\tau(\alpha) &= A_\tau \alpha^2 + B_\tau \alpha + C_\tau, \\
 A_\tau &= -10^{-2} (2.26\nu^2 + 2.07\nu + 2.3) \cdot D_\tau^{0.079\nu^2 + 0.1754\nu - 1.342}, \\
 B_\tau &= (0.0573\nu^2 + 0.0937\nu + 0.202) \cdot D_\tau^{0.0274\nu^2 + 0.0529\nu - 0.8765}, \\
 C_\tau &= 10^{-4} (9.654\nu^2 + 4.945\nu + 3.1) \cdot D_\tau^{0.01867\nu^2 + 0.4011\nu - 1.8186}, \\
 D_\tau &= \frac{G_H}{\pi G}.
 \end{aligned}$$

Здесь K_C, G_C – объемный и сдвиговый эффективные модули упругости цементированной гидратом пористой среды, G_h, ν_h – упругий модуль сдвига и коэффициент Пуассона для гидрата, n – среднее число контактов одного зерна с соседними, ϕ – пористость, s_h – гидратонасыщенность. Функции $S_n(\alpha), S_\tau(\alpha)$ зависят от G, ν, G_h, ν_h . Параметр α зависит от гидратонасыщенности s_h и характеризует отношение радиуса цементующего гидрата к радиусу зерна. При контактном цементировании (the contact-cementing model) $\alpha = \alpha_{CC}$, при оболочкающем цементировании (the envelope-cementing model) $\alpha = \alpha_{EC}$:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{CC} &= 2 \left(\frac{\phi s_h}{3n(1-\phi)} \right)^{0.25}, \\
 \alpha_{EC} &= \left(\frac{2\phi s_h}{3(1-\phi)} \right)^{0.5}.
 \end{aligned}$$

Для расчета эффективных упругих модулей по данной модели необходимы значения упругих модулей породы скелета и гидрата, среднее число контактов n (для упаковки сферических шариков обычно используется $n \approx 9$ [7]) и выражения для $S_n(\alpha), S_\tau(\alpha)$. Формулы для $S_n(\alpha), S_\tau(\alpha)$ [5] являются статистическими приближениями (погрешность не превышает 1 %) строгих решений теории цементации [7].

3. Пористая среда, насыщенная жидкостью и гидратом.

Модули упругости скелета K_{sat}, G_{sat} насыщенной жидкостью пористой среды вычисляются согласно теории Гассмана:

$$K_{sat} = K \frac{\phi K_{dry} - \frac{(1+\phi)K_f K_{dry}}{K} + K_f}{(1-\phi)K_f + \phi K - \frac{K_f K_{dry}}{K}}, \quad G_{sat} = G_{dry},$$

где K_{dry}, G_{dry} – модули упругости скелета сухой пористой среды, K_f – объемный модуль упругости жидкости. Как показали опыты, при образовании гидрата из растворенного газа или из смеси воды и ТГФ реализуется схема «load-bearing». В этом случае для расчета модулей упругости пористой среды, насыщенной водой и гидратом, в приведенных выше формулах вместо K_{dry}, G_{dry} используется K_{LB}, G_{LB} , а вместо K_f

$$\bar{K}_f = \left[\frac{s_h}{K_h} + \frac{1-s_h}{K_f} \right]^{-1}.$$

Экспериментальные исследования акустических свойств гидратосодержащих сред

Для понимания и правильной интерпретации результатов сейсморазведки и акустического каротажа, построения и проверки математических моделей упругих модулей гидратосодержащих пористых сред необходимо проведение лабораторных исследований. Уместно отметить, что ряд моделей являются полуэмпирическими, не отражают физики процессов, не говоря уже о формулах, аппроксимирующих экспериментальные точки.

В экспериментальных работах основным способом определения упругих модулей является измерение скоростей продольных и поперечных ультразвуковых волн (C_P , C_S) и гидратонасыщенности (s_h) в образцах пористых сред в процессе образования и разложения газового гидрата. В пористой среде продольная волна имеет две моды – быструю (деформационную) и медленную (фильтрационную). Пористая среда обладает дисперсионными и диссипативными свойствами, поэтому скорости волн зависят от частоты возмущения, а их амплитуды уменьшаются по мере распространения. Медленная волна имеет меньшую скорость и интенсивнее затухает по сравнению с быстрой волной. В экспериментах обычно используют ультразвуковые возмущения и под продольной волной имеют в виду ее быструю моду. При обработке результатов используют формулы для скоростей волн в твердом теле:

$$C_P = \sqrt{\frac{K + 4/3G}{\rho}}, \quad C_S = \sqrt{G/\rho},$$

где K , G – объемный и сдвиговый модули упругости, ρ – плотность.

Если образец среды можно моделировать стержнем, то используется формула для скорости продольной волны в стержне:

$$C = \sqrt{E/\rho}, \quad E = \frac{9GK}{3K + G}.$$

Эксперименты проводятся, в основном, с высокопроницаемыми синтетическими образцами (шарики из кварца), либо насыпными крупнозернистыми средами (песок). В качестве гидратообразующего вещества обычно используется газ метан (CH_4), либо жидкость тетрагидрофуран (ТГФ, $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$). В исходном состоянии, до образования гидрата, газ может быть свободным или растворенным в воде. Для лабораторного моделирования пласта, содержащего гидрат и газ, эксперимент обычно проводится с нагнетанием метана по методике «с избытком газа». В зависимости от начального содержания воды в порах может образоваться различное количество гидрата и, соответственно, могут реализоваться схемы “contact – cementing”, “envelope – cementing”, “load – bearing” и их комбинации. Для случая пласта с гидратом и водой в опытах используется смесь ТГФ с водой, которая является однофазной двухкомпонентной жидкостью, или вода с растворенным метаном.

В работе [9] проведены эксперименты с образцами песка, содержащими различное количество гидрата метана. Результаты показали резкое возрастание скоростей C_P , C_S при изменении содержания гидрата от 0 до $\approx 3\text{--}5\%$ и при дальнейшем увеличении гидратосодержания – постепенное увеличение C_P и C_S . Это говорит о том, что гидрат метана вначале цементирует песок, затем заполняет поровое пространство. Результаты продемонстрировали влияние цементации песка гидратом на скорости упругих волн. Эксперименты с образцами, содержащими гидрат ТГФ [10], показали, что с увеличением содержания гидрата в поровом пространстве скорость продольной волны монотонно возрастает и стремится к предельному значению. В работе [11] представлены результаты исследования по сбору и анализу результатов измерений скоростей волн в восьми лабораториях из нескольких стран. Были измерены скорости P - и S - волн (C_P и C_S) в сухом, частично и полностью насыщенном водой, замороженном и содержащем гидрат метана Оттавском песке F110. Наблюдался значительный разброс значений скоростей, который, в основном, объяснялся различиями в уплотнении и пористости образцов, неоднородным распределением поровых жидкостей, льда и гидрата, а также отличиями в методах подготовки образцов и измерений в разных лабораториях. В экспериментах [12] измерялись гидратонасыщенность (s_h) и скорости ультразвуковых P - и S - волн (C_P и C_S) в процессе образования газового гидрата в образцах. Анализ результатов показал, что гидрат вначале образовался на контактах зерен, затем рос в поровом пространстве и достиг стенок пор.

Первая в России оригинальная установка и опыты по созданию гидратосодержащих образцов и изучению их акустических свойств были описаны в статье [13]. Позже проведена большая (более ста) серия работ [14] и получены результаты экспериментов по измерению акустических свойств образцов с широким спектром веществ и параметров. В исследованиях [15–16] представлены результаты опытов с песчаными образцами, содержащими разные объемы воды, льда, гидратов метана и ТГФ. Полученные зависимости акустических скоростей интерпретируются как соответствующие разным типам заполнения пор льдом или гидратом: модель «цементации» контактов между зёрнами песка при образовании льда гидрата, модель «цементации» с обволакиванием зерна при образовании гидрата метана, модель

«заполнения» пор при образовании гидрата ТГФ. Отмечается, что при малых (менее 0.2) насыщенностях льдом или гидратом скорости продольных и поперечных волн быстро растут и очень близки. Далее, с увеличением насыщенности в случае льда скорости продолжают расти, а в случае гидрата рост сильно замедляется. Однако с достижением гидратонасыщенностью значений 0.6–0.7 скорости вновь быстро возрастают. Последнее можно объяснить тем, что частицы в порах касаются стенок и несут нагрузку вместе со скелетом. В опытах также измерялось затухание (поглощение) волн. Отмечено, что с образованием льда или гидрата при малых насыщенностях поглощение резко уменьшается, что также свидетельствует о консолидации скелета за счет цементации. В работе [17] проведены опыты с образованием гидрата из растворенного в воде метана. Отмечается, что так же, как в случае ТГФ, скорости волн с увеличением гидратонасыщенности растут плавно. Опыты с гидрофобным песком показали, что в этом случае гидрат образуется по схеме «заполнения пор» и не цементирует скелет. В другом опыте [18] обнаружены два эффекта: падение скоростей при длительной выдержке образца с гидратом и с увеличением температуры, причем темп падения увеличивается с приближением температуры к равновесной. Кроме описанных, проводились опыты с угольными образцами, гидратом ксенона [19], в последнем случае одновременно выполнялась рентгеновская томография. В работе [20] с помощью синхротронного рентгеновского излучения выполнена уникальная трехмерная визуализация процессов образования и разложения гидрата в масштабе пор песчаного образца. В частности, отмечено, что поведение гидрата при разложении может зависеть от истории его образования.

Заметим, что наблюдаемые в экспериментах значения скоростей имеют существенный разброс. Например, в экспериментах [12] с гидратом метана при изменении s_h от 0 до $\approx 0.6 \div 0.7$ скорости изменялись в пределах

$$712 \text{ (м/с)} \leq C_S \leq 1189 \text{ (м/с)}, 1722 \text{ (м/с)} \leq C_P \leq 2583 \text{ (м/с)}.$$

В экспериментах [14] при изменении s_h от 0 до 0.7 скорости изменялись в пределах

$$950 \text{ (м/с)} \leq C_S \leq 2550 \text{ (м/с)}, 1400 \text{ (м/с)} \leq C_P \leq 4000 \text{ (м/с)}.$$

Сопоставление результатов экспериментов с данными других авторов и верификация математических моделей упругих модулей выполнены в [21]. В работе использованы результаты [11, 9, 22–24] для метангидрата и [25–27] — для ТГФ. Несмотря на количественные отличия, вызванные различием в установках и методиках, все результаты демонстрируют отчетливую зависимость скоростей волн от гидратонасыщенности. При верификации математических моделей отмечено, что результаты опытов в случае образования гидрата по методу «с избытком газа» хорошо описываются моделью «envelope – cementing», а в случае ТГФ лучше подходит модель «load – bearing».

Заключение

Выполнен анализ современного состояния экспериментальных и теоретических исследований упругих свойств гидратосодержащих пористых сред. В экспериментальных работах основным способом определения упругих модулей является измерение скоростей продольных и поперечных ультразвуковых волн и гидратонасыщенности в неконсолидированных образцах в процессе образования и разложения газового гидрата. Эксперименты проводятся с высокопроницаемыми синтетическими образцами либо насыпными крупнозернистыми средами. В качестве гидратообразующего вещества обычно используется газ метан или жидкость тетрагидрофуран (ТГФ). Во всех экспериментах установлена связь скоростей упругих волн с содержанием гидрата в поровом пространстве, а именно, наблюдается рост скоростей с увеличением гидратонасыщенности. При этом в зависимости от условий образования гидрата выделяются два характерных вида зависимостей. Если поры заполнены газом и гидратом, то скорости резко возрастают при малых гидратонасыщенностях (< 0.2), далее темп роста падает и снова увеличивается при больших гидратонасыщенностях (> 0.6). В этом случае в зависимости от начального содержания воды гидрат образуется на контактах зерен скелета или обволакивает их и цементирует скелет, далее растет в порах и начинает касаться стенок пор и увеличивает жесткость скелета. Если поры заполнены гидратом и водой, насыщенной газом, или тетрагидрофураном, то гидрат растет в порах и начинает влиять на жесткость скелета после достаточного заполнения порового пространства. Наблюдаемые в экспериментах различных авторов значения скоростей имеют разброс, что объясняется различием свойств образцов, установок и методик проведения экспериментов.

Созданы математические модели упругих модулей гидратосодержащих пористых сред, позволяющие качественно и количественно описать результаты лабораторных опытов. При построении мо-

делей учитываются параметры основной породы и насыщающих среду флюида и гидрата (плотности, упругие модули, пористость, насыщенности фаз). Модели могут содержать параметры, значения которых следует подбирать из условия совпадения измеренных в эксперименте и рассчитанных скоростей упругих волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Voigt W. *Lehrbuch der Kristallphysik*. Leipzig: Teubner; 1928. 962 p.
2. Reuss A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung (Determination of the Yield Point of Polycrystals Based on the Yield Condition of Single Crystals). *Z. Angew. Math. Und Mech.* 1929;9(1):49–58.
3. Hill R. The Elastic Behaviour of a Crystalline Aggregate. *Proc. Phys. Soc. A.* 1952;65:349–354.
4. Helgerud M. B., Dvorkin J., Nur A. Elastic-Wave Velocity in Marine Sediments with Gas Hydrates: Effective Medium Modeling. *Geophys. Res. Letters.* 1999;26(13):2021–2024.
5. Dvorkin J., Nur A. Elasticity of High-Porosity Sandstones: Theory for Two North Sea Data Sets. *Geophysics.* 1996;61:1363–1370.
6. Mindlin R. D. Compliance of Elastic Bodies in Contact. *Journal of Applied Mechanics.* 1949;16:259–268.
7. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis in Porous Media*. Cambridge University Press, Cambridge; 1998.
8. Dvorkin J., Nur A., Yin H. Effective Properties of Cemented Granular Materials. *Mech. Mater.* 1994;18:351–366.
9. Priest J. A., Best A. I., Clayton C. R. I. A Laboratory Investigation into Seismic Velocities of Methane Gas Hydrate-Bearing Sand. *Journal of Geophysical Research.* 2005;110:B04102.
10. Li Feng-Guang, Sun Chang-Yu, Zhang Qin, Liu Xiao-Xiang, Guo Xu-Qiang, Chen Guang-Jin. Laboratory Measurements of the Effects of Methane/Tetrahydrofuran Concentration and Grain Size on the P-Wave Velocity of Hydrate-Bearing Sand. *Energy Fuels.* 2011;25:2076–2082. dx.doi.org/10.1021/ef101665v.
11. Waite W. F., Santamarina J. C., Rydzy M., Chong S. H., Grozic J. L. H., Hester K., Howard J., Kneafsey T. J., Lee J. Y., Nakagawa S., Priest J., Rees E., Sloan E. D. Overview of the Inter-Laboratory Comparison of Wave Velocity Measurements in Sand with Gas Hydrates and Other Pore-Filling Materials. *Fire in the Ice.* 2012;12(1):16–21.
12. Bu Q. T., Hu G. W., Ye Y. G., Liu C. L., Li C. F., Best A. I., Wang J. C. The Elastic Wave Velocity Response of Methane Gas Hydrate Formation in Vertical Gas Migration Systems. *J. Geophys. Eng.* 2017;14:555–569.
13. Дучков А. Д., Дучков А. А., Манаков А. Ю., Пермяков М. Е., Голиков Н. А., Дробчик А. Н. Лабораторное моделирование и измерение акустических свойств образцов пород, содержащих гидраты метана. *Доклады Академии наук.* 2017;472(1):80–84. DOI: 10.7868/S0869565217010169.
14. 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;478(1):94–99.
15. Дугаров Г. А., Дучков А. А., Дучков А. Д., Дробчик А. Н. Лабораторное изучение акустических свойств гидратосодержащих осадков. *Ученые записки физического факультета Московского университета.* 2017;5:1750812.
16. 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;60(2):230–242. DOI: 10.15372/GiG2019015.
17. Нефедкина Т. В., Лыхин П. А., Дугаров Г. А. Определение упругих параметров азимутально-анизотропных сред из многоволновых AVOA-данных методом нелинейной оптимизации. *Геофизические технологии.* 2018;2:14–26. DOI: 10.18303/2619–1563–2018–2–2.
18. Фокин М. И., Дугаров Г. А., Дучков А. А. Экспериментальные акустические измерения на песчаных неконсолидированных образцах, содержащих гидрат метана. *Ученые записки физического факультета Московского университета.* 2019;4:1940501.
19. Дробчик А. Н., Дугаров Г. А., Дучков А. А., Купер К. Э. Акустические измерения и рентгеновская томография песчаных образцов, содержащих гидрат ксенона. *Геофизические технологии.* 2019;4:17–23. DOI: 10.18303/2619–1563–2019–4–17.

20. Nikitin V. V., Dugarov G. A., Duchkov A. A., Fokin M. I., Drobchik A. N., Shevchenko P. D., De Carolod F., Mokso R. Dynamic In-Situ Imaging of Methane Hydrate Formation and Selfpreservation in Porous Media. *Marine and Petroleum Geology*. May 2020;115:104234. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104234>.
21. 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;63:38-46. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.01.007>.
22. Ebinuma T., Suzuki K., Nagao J., Oyama H., Narita H. Ultrasonic Wave Velocities Associated with Formation and Dissociation of Methane Hydrate in Artificial Sandy Sediment. *Offshore Technology Conference*. 2008; OTC 19260.
23. Ren Shao Ran, Liu Yongjun, Liu Yixing, Zhang Weidong. Acoustic Velocity and Electrical Resistance of Hydrate Bearing Sediments. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2010;70(1–2):52–56. DOI: 10.1016/j.petrol.2009.09.001.
24. Rydzy M. B. *The Effect of Hydrate Formation on the Elastic Properties of Unconsolidated Sediment*. 2014. PhD thesis. Colorado School of Mines, Colorado, USA.
25. Yun T. S., Francisca F. M., Santamarina J. C., Ruppel C. Compressional and Shear Wave Velocity in Uncemented Sediment Containing Gas Hydrate. *Geophysical Research Letters*. 2005;32:L10609.
26. Lee J. Y., Francisca F. M., Santamarina J. C., Ruppel C. Parametric Study of the Physical Properties of Hydrate-Bearing Sand, Silt, and Clay Sediments: 2. Small-Strain Mechanical Properties. *Journal of Geophysical Research*. 2010;115:B11105. DOI: 10.1029/2009JB006670.
27. Lee J. Y., Santamarina J. C., Ruppel C. Volume Change Associated with the Formation and Dissociation of Hydrate in Sediment. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2010;11(3):13.