

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

© А. А. ГУБАЙДУЛЛИН,¹
О. Ю. БОЛДЫРЕВА,² Д. Н. ДУДКО²

¹Тюменский государственный университет
^{1,2}Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
gubai@tmn.ru, timms@ikz.ru, timms@ikz.ru

УДК 532.546:534.1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН СЖАТИЯ И РАЗРЕЖЕНИЯ В ГАЗОВЫХ ГИДРАТАХ

INVESTIGATION OF COMPRESSION AND RAREFACTION WAVE PROPAGATION IN GAS HYDRATES

В работе исследуется распространение волн сжатия и разрежения в пористой среде. Ее скелет представляет собой газовый гидрат, который может образоваться или разложиться во время данного процесса. Также анализируется влияние параметров среды и интенсивности падающей волны на эволюцию волн сжатия и разрежения в представленной среде. Установлено, что на рассматриваемом временном промежутке процессы разложения (образования) гидрата при прохождении волны разрежения (сжатия) не оказывают заметного влияния на характер ее распространения.

Propagation of compression or rarefaction acoustic waves in porous medium, the skeleton of which is gas hydrate, is investigated. Hydrate association or dissociation is possible during wave propagation. The influence of medium and initial wave parameters on wave evolution is analyzed. It is shown that the processes of hydrate association or dissociation have no visible impact on wave propagation during the considered time.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Пористая среда, газовый гидрат, акустические волны.
KEY WORDS. Porous medium, gas hydrate, acoustic waves.

Введение

В настоящее время значительный интерес представляют исследования газогидратов углеводородных газов, особенно метана. Это связано с тем, что природные гидраты метана представляют собой практически неисчерпаемый источник энергии и пресной воды, а также являются причиной аварийных ситуаций и экологических катастроф при добыче углеводородного сырья и транспортировке газа. Актуальными являются экспериментальные и теоретические исследования поведения газовых гидратов в пористых структурах [1, 2, 5]. Газогидраты метана в природных пластах могут присутствовать в различных формах: в поровом пространстве без разрушения пор или с ним, в виде частиц или линз небольшого размера, а также чисто гидратных пластов большой протяженности [2]. Поэтому для обнаружения и освоения газогидратных залежей важной задачей является изучение особенностей волновых процессов в газогидратных пластах.

Постановка задачи, уравнения движения

Для исследования распространения волн в пористой среде, представляющей собой газовый гидрат и воду с гидратообразующим газом, выбрана двухскоростная, двухтемпературная модель насыщенной пористой среды с двумя напряжениями [3, 4]. Обозначения соответствуют указанным в монографиях. Нижний индекс s соответствует параметрам скелета, l — жидкости, g — газа, $l+g$ — газожидкостной смеси.

Уравнения баланса массы, импульса и энергии имеют вид:

$$\frac{\partial \rho_{l+g}}{\partial t} + \nabla^i (\rho_{l+g} v_l^i) = -J, \quad \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla^i (\rho_g v_l^i) = -GJ, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla^i (\rho_s v_s^i) = J,$$

$$\rho_{l+g} \frac{d_l v_l^i}{dt} = -\alpha_{l+g} \nabla^i p_l - F^i - \alpha_{l+g} J (v_s^i - v_l^i),$$

$$\rho_s \frac{d_s v_s^i}{dt} = -\alpha_s \nabla^i p_l + \nabla^j \sigma_{s*}^{ji} + F^i - \alpha_s J (v_s^i - v_l^i),$$

$$\rho_{l+g} \frac{d_l u_{l+g}}{dt} = \frac{\alpha_{l+g} p_l}{\rho_{l+g}^\circ} \frac{d_l \rho_{l+g}^\circ}{dt} + F^i (v_s^i - v_l^i) - J (i_{l+g,a} - i_{l+g}) - Q,$$

$$\rho_s \frac{d_s u_s}{dt} = \frac{\alpha_s p_l}{\rho_s^\circ} \frac{d_s \rho_s^\circ}{dt} + \sigma_{s*}^{ij} \nabla^j v_s^i + Q.$$

Скелет является упругим, его жидкость и материал подчиняются уравнениям состояния в акустическом приближении. Для газа принято уравнение состояния совершенного газа. Давление и температура в газе и жидкости совпадают.

$$\sigma_{s^*}^{ij} = \alpha_s (\lambda_{s^*} \delta^{ij} \varepsilon_s^{mm} + 2\mu_{s^*} \varepsilon_s^{ij} + \nu_{s^*} \delta^{ij} p_l), \nu_{s^*} = (\lambda_{s^*} + 2/3 \mu_{s^*}) / \rho_{s0}^\circ C_s^2,$$

$$\frac{d_s \varepsilon_s^{ij}}{dt} = \frac{1}{2} (\nabla^i v_s^j + \nabla^j v_s^i),$$

$$p_s - p_{s0} = C_s^2 (\rho_s^\circ - \rho_{s0}^\circ), p_l - p_{l0} = C_l^2 (\rho_l^\circ - \rho_{l0}^\circ),$$

$$p_g = \rho_g^\circ R_g T_g, p_g = p_l, T_g = T_l, u_s = c_s T_s, u_{l+g} = c_{l+g} T_l.$$

Силовое и тепловое взаимодействия фаз описываются соотношениями:

$$F = F_m + F_\mu, F_m = \frac{1}{2} \eta_m \alpha_s \rho_{l+g} \left(\frac{d_l v_l}{dt} - \frac{d_s v_s}{dt} \right),$$

$$F_\mu = \eta_\mu \alpha_s \alpha_{l+g} \mu_l a_{s^*}^{-2} (v_l - v_s),$$

$$Q = 6\alpha_s \lambda_{l+g} \text{Nu}(T_l - T_s) / (2a_{s^*})^2, \text{Nu} = \begin{cases} 2 + 0.106 \text{Re} \text{Pr}^{1/3}, & \text{Re} \leq 200 \\ 2.27 + 0.6 \text{Re}^{0.67} \text{Pr}^{1/3}, & \text{Re} > 200 \end{cases}$$

При этом вблизи линии фазового равновесия системы «гидрат метана ↔ метан + вода», задаваемой уравнением:

$$\frac{p_{sat}}{p_{sat0}} = \exp\left(\frac{T_{sat} - T_{sat0}}{T_*}\right), p_{sat0} = 5.5 \text{ МПа}, T_{sat0} = 280 \text{ К}, T_* = 10 \text{ К},$$

может происходить разложение или образование гидрата:

$$J = -Q/l_h.$$

Для замыкания используются соотношения, связывающие истинные и приведенные плотности, а также связь между истинными давлениями в фазах и приведенным давлением в скелете пористой среды:

$$\rho_s = \alpha_s \rho_s^\circ, \rho_{l+g} = \alpha_l \rho_l^\circ + \alpha_g \rho_g^\circ, \alpha_s + \alpha_l + \alpha_g = 1,$$

$$p_{s^*} = \alpha_s (p_s - p_l), p_{s^*} = -\frac{1}{3} \sigma_{s^*}^{mm}.$$

В представленных уравнениях верхние индексы – координатные, нижний индекс 0 означает невозмущенное значение величины, а штрих — ее отклонение от невозмущенного значения ($w' = w - w_0$); $\alpha_j, \rho_j, \rho_j^\circ, \nu_j, T_j, u_j$ — это объемное содержание, приведенная и истинная плотность, скорость, температура и внутренняя энергия j -фазы; p_l — давление в жидкости; σ_{s^*} — приведенное напряжение в скелете среды; $\alpha_s \lambda_{s^*}, \alpha_s \mu_{s^*}$ — модули упругости скелета пористой среды;

ε_s — деформации твердой фазы; p_s — давление внутри нее; C_s, C_l — скорость звука для материала твердой фазы и жидкости; J, F, Q — интенсивность гидратообразования, сила межфазного взаимодействия и интенсивность межфазного теплообмена; c_s, c_{l+g} — удельные теплоемкости для гидрата и газожидкостной смеси; l_h — удельная теплота гидратообразования; a_* — характерный размер пор или зерен; η_m, η_μ — безразмерные коэффициенты взаимодействия фаз, зависящие от структуры среды.

Результаты расчетов

На основе метода Лакса — Вендроффа была разработана методика расчета движения пористой среды, содержащей жидкость с пузырьками газа, а также проведено численное исследование распространения волн давления в такой среде. Возмущение в пористой среде ($x > 0$) создается волной, падающей из чистой жидкости ($x < 0$).

Было изучено влияние параметров и исходного импульса на эволюцию волн в рассматриваемой пористой среде. Установлено, что при термодинамических условиях, близких к линии фазового равновесия «метан+вода \leftrightarrow гидрат метана», возможно образование или разложение гидрата в процессе прохождения волны.

На рисунках 1, 2 показано изменение полного напряжения σ (сплошные линии) и перепада давления в жидкости Δp (штриховые линии) при прохождении волны сжатия (рис. 1) и разрежения (рис. 2) ступенчатого профиля. Расчетные кривые приведены в моменты времени $t = 1$ и 3 мс (рис. 1, 2) и в точках $x = 5$ и 10 см как функции времени (рис. 2). Равновесное давление и температура в пористой среде $p_0 = 5.5$ МПа, $T_0 = 280$ К, начальные объемные содержания воды и газа в пористой среде равны 0.396 и 0.004, амплитуда падающей из жидкости в пористую среду волны составляет $0.5p_0$ в случае волны сжатия, $0.5p_0$ — волны разрежения. При падении продолжительной волны сжатия из жидкости во время прохождения по пористой среде быстрой и медленной волн образуется гидрат, и, вследствие этого, уменьшается газосодержание. При

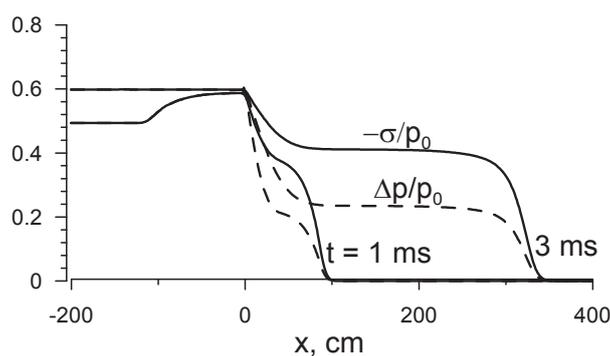


Рис. 1

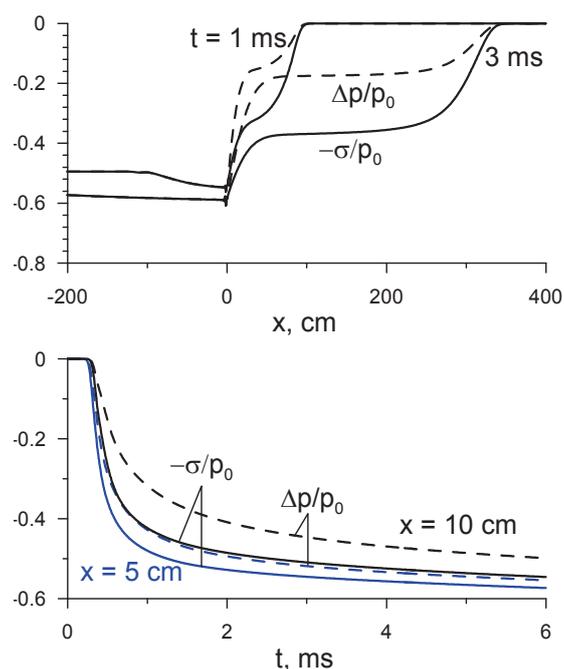


Рис. 2

взаимодействии с волной разрежения, напротив, происходит разложение гидрата. Установлено, что на рассматриваемом временном промежутке процессы разложения (образования) гидрата при прохождении волны разрежения (сжатия) не оказывают заметного влияния на характер ее распространения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губайдуллин А. А. Распространение волн в пористой среде, насыщенной газогидратом или льдом / А. А. Губайдуллин, О. Ю. Болдырева, Д. Н. Дудко // Вестник Новосибирского гос. университета. 2012. Т. 12. № 4. С. 49-53.
2. Макогон Ю. Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы / Ю. Ф. Макогон // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). 2003. Т. XLVII. № 3. С. 70-79.
3. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. М.: Наука, 1978. 336 с.
4. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
5. Тохиди Б. Газогидратные исследования в университете Хериот-Ватт (Эдинбург) / Б. Тохиди, Р. Андерсон, А. Масоуди, Дж. Арджманди, Р. Бургасс, Дж. Янг // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева). 2003. Т. XLVII. № 3. С. 49-58.

REFERENCES

1. Gubaidullin A. A., Boldyreva O. Yu., Dudko D. N. Rasprostranenie voln v poristoj srede, насыщенной газогидратом или льдом [Wave Propagation in Porous Medium Saturated with Gas Hydrate of Ice] // Vestnik Novosibirskogo Gosudarstvennogo Universiteta [Novosibirsk State University Herald]. 2012. Vol. 12. No 4. Pp. 49-53. (In Russian)
2. Makogon Yu. F. Prirodnye gazovye gidraty: rasprostranenie, modeli obrazovaniya, resursy [Natural Gas Hydrates: Distribution, Models of Formations, Resources] // Rossijskij himicheskij zhurnal [Russian Chemical Journal]. 2003. Vol. XLVII. No 3. Pp. 70-79. (In Russian)
3. Nigmatulin R. I. Osnovy mehaniki geterogennyh sred [Fundamentals of Mechanics of Heterogeneous Media]. M.: Nauka [Science], 1978. (In Russian)
4. Nigmatulin R. I. Dinamika mnogofaznyh sred [Dynamics of Multiphase Media]. M.: Nauka [Science], 1987. Part 1. 464 p. (In Russian)
5. Tohidi B., Anderson R., Masoudi A., Arjmandi J., Burgass R., Yang J. Gazogidratnye issledovaniya v universitete Heriot-Watt (Jedinburg) [Hydrate Research in the Heriot-Watt University (Edinburgh)] // Rossiiskii Himicheskii Zhurnal [Russian Chemical Journal]. 2003. Vol. XLVII. No 3. Pp. 49-58. (In Russian)

Авторы публикации

Губайдуллин Амир Анварович — доктор физико-математических наук, профессор кафедры механики многофазных систем Тюменского государственного университета, директор Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

Болдырева Ольга Юрьевна — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

Дудко Дина Николаевна — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Тюменского филиала Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

Authors of the publication

Amir A. Gubaidullin — Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor at the Department of Multiphase Systems Mechanics, Tyumen State University, Director of Tyumen Branch of Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Olga Yu. Boldyreva — Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher at the Tyumen Branch of Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Dina N. Dudko — Cand. Sci. (Phys. and Math.), Researcher at the Tyumen Branch of Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences