

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН
В ГАЗОВЫХ ГИДРАТАХ**

А.А. Губайдуллин, О.Ю. Болдырева, Д.Н. Дудко

*Тюменский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской Академии наук (ТюмФ ИТПМ СО РАН)
625026, г. Тюмень, Россия*

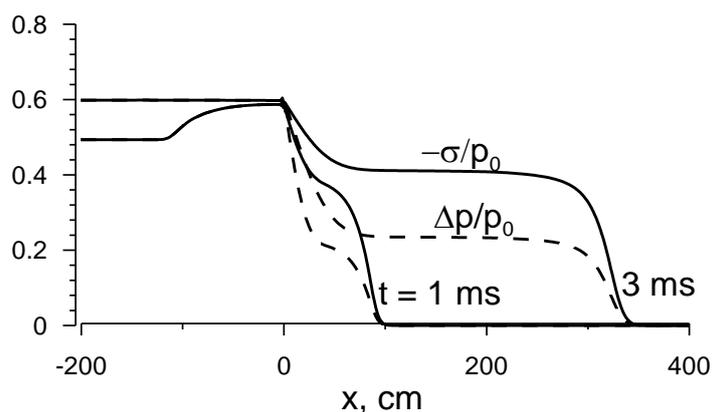
Для исследования распространения волн в пористой среде, представляющей собой газовый гидрат и воду с гидратообразующим газом, выбрана двухскоростная, двухтемпературная с двумя напряжениями модель насыщенной пористой среды [1, 2]. Обозначения соответствуют обозначениям указанных монографий.

Уравнения движения, состояния, замыкающие соотношения имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{l+g}}{\partial t} + \nabla^i (\rho_{l+g} v_l^i) &= -J, & \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla^i (\rho_g v_l^i) &= -GJ, & \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla^i (\rho_s v_s^i) &= J, \\ \rho_{l+g} \frac{d_l v_l^i}{dt} &= -\alpha_{l+g} \nabla^i p_l - F^i - \alpha_{l+g} J (v_s^i - v_l^i), \\ \rho_s \frac{d_s v_s^i}{dt} &= -\alpha_s \nabla^i p_l + \nabla^j \sigma_{s*}^{ij} + F^i - \alpha_s J (v_s^i - v_l^i), \\ \rho_{l+g} \frac{d_l u_{l+g}}{dt} &= \frac{\alpha_{l+g} p_l}{\rho_{l+g}^\circ} \frac{d_l \rho_{l+g}^\circ}{dt} + F^i (v_s^i - v_l^i) - J (i_{l+g,a} - i_{l+g}) - Q, \\ \rho_s \frac{d_s u_s}{dt} &= \frac{\alpha_s p_l}{\rho_s^\circ} \frac{d_s \rho_s^\circ}{dt} + \sigma_{s*}^{ij} \nabla^j v_s^i + Q, \\ \sigma_{s*}^{ij} &= \alpha_s (\lambda_{s*} \delta^{ij} \varepsilon_s^{mm} + 2\mu_{s*} \varepsilon_s^{ij} + \nu_{s*} \delta^{ij} p_l), & \nu_{s*} &= (\lambda_{s*} + 2/3 \mu_{s*}) / \rho_{s0}^\circ C_s^2, \\ \frac{d_s \varepsilon_s^{ij}}{dt} &= \frac{1}{2} (\nabla^i v_s^j + \nabla^j v_s^i), \\ p_s - p_{s0} &= C_s^2 (\rho_s^\circ - \rho_{s0}^\circ), & p_l - p_{l0} &= C_l^2 (\rho_l^\circ - \rho_{l0}^\circ), \\ p_g &= \rho_g^\circ R_g T_g, & p_g &= p_l, & T_g &= T_l, \\ F &= F_m + F_\mu, & F_m &= \frac{1}{2} \eta_m \alpha_s \rho_{l+g} \left(\frac{d_l v_l}{dt} - \frac{d_s v_s}{dt} \right), & F_\mu &= \eta_\mu \alpha_s \alpha_{l+g} \mu_l a_{s*}^{-2} (v_l - v_s), \\ Q &= 6\alpha_s \lambda_{l+g} \text{Nu} (T_l - T_s) / (2a_{s*})^2, & J &= -Q / l_h \\ \rho_s &= \alpha_s \rho_s^\circ, & \rho_{l+g} &= \alpha_l \rho_l^\circ + \alpha_g \rho_g^\circ, & \alpha_s + \alpha_l + \alpha_g &= 1, \\ p_{s*} &= \alpha_s (p_s - p_l), & p_{s*} &= -\frac{1}{3} \sigma_{s*}^{mm}. \end{aligned}$$

На основе метода Лакса – Вендроффа была разработана методика расчета движения пористой среды, содержащей жидкость с пузырьками газа, и 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 среды 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», в процессе прохождения волны возможно образование или разложение гидрата.



На Рисунке показано изменение полного напряжения σ (сплошные линии) и давления в жидкости p (штриховые линии) при прохождении волны сжатия ступенчатого профиля. Равновесные 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 падения продолжительной волны сжатия из жидкости при прохождении по пористой среде быстрой и медленной волн образуется гидрат и вследствие этого уменьшается газосодержание. При взаимодействии с волной разрежения, напротив, происходит разложение гидрата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336с.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. М.: Наука, 1987. 464с.