

ФЛЮИДОДИНАМИКА В МНОГОРАНГОВЫХ СОСТАВНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

О.А.Хачай¹, А.Ю.Хачай².

¹ИГФ УрО РАН

²УРФУ

Разработан новый 2D алгоритм моделирования для дифракции звука на пористых влагонасыщенных включениях иерархической структуры, перемежаемых пластическими или упругими пропластками и расположенных в J -ом слое N -слойной упругой среды. Построен алгоритм с учетом возможности перемещения иерархических включений из слоя в слой с течением времени. Если нефть обладает еще и аномальной вязкостью, для выбора частотного наполнения акустического воздействия на область резервуара, заполненного этой нефтью, необходимо использовать результаты моделирования в иерархических средах с использованием разработанных алгоритмов.

Введение

Экспериментальные и теоретические исследования механизмов вибрационной стимуляции нефтеотдачи обводненных месторождений с использованием вибровоздействия приводят к выводу о развитии резонансных колебаний в трещиновато-блочных пластах [Дрягин В.В., 2018]. Эти колебания, вызванные слабыми, но длительными и стабильными по частоте воздействиями, создают условия для генерации в пластах ультразвуковых волн, которые способны разрушать загустевшие нефтяные пленки в трещинах коллекторов [Лавров А. В., Шкуратник В. Л., 2005].

Измерение высокочастотных сейсмоакустических полей в скважинах вблизи областей концентрации напряжений в массивах горных пород, а также в трещиновато-пористых флюидонасыщенных слоях при низкочастотных вибровоздействиях указывает на возникновение ультразвуковых колебаний в сотни и тысячи герц. В кристаллических массивах существование этих полей связано с процессом образования новых трещин, в флюидонасыщенных средах, наряду с упругими могут возникать и гидродинамические причины. Для трещиновато-пористых коллекторов, находящихся в процессе эксплуатации методом высоконапорного вытеснения нефти водой возможность интенсификации ультразвуковых колебаний может иметь важное технологическое значение. Даже очень слабый ультразвук способен разрушать за длительное время действия вязкие нефтяные пленки, образующиеся в трещинах между блоками, что может быть причиной понижения проницаемости пластов и уменьшения нефтеотдачи [Алексеев А. С., Цецохо В. А., и др., 2001].

Для описания перечисленных эффектов необходимо рассмотреть волновой процесс в иерархически блоковой среде и теоретически промоделировать механизм возникновения автоколебаний под действием релаксационных сдвиговых напряжений [Oil and Gas exploration. Methods and Application.,2017a; Computational and experimental studies of Acoustic Waves.2017b; Numerical analysis of nonlinear coupled problems.2019].

Алгоритм моделирования распространения продольной волны в среде с иерархическими включениями.

Идею, изложенную в работах [Хачай О.А., Хачай А.Ю.,2018] для решения прямой задачи для двумерного случая распространения продольной волны через локальную упругую неоднородность с иерархической структурой, расположенной в J -ом слое N -слойной среды, распространим на случай, когда на L -ом иерархическом уровне окажется пористое влагонасыщенное включение.

$$\begin{aligned}
 & \frac{(k_{1jil}^2 - k_{1j}^2)}{2\pi} \iint_{S_{cl}} \varphi_l(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \frac{\sigma_{ja}}{\sigma_{jil}} \varphi_{l-1}^0(M^0) - \\
 & - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jil})}{\sigma_{jil} 2\pi} \oint_{Cl} G_{Sj} \frac{\partial \varphi_l}{\partial n} dc = \varphi_l(M^0) n_{pi} M^0 \in S_{Cl}; \\
 & \frac{\sigma_{jil} (k_{1jil}^2 - k_{1j}^2)}{\sigma(M^0) 2\pi} \iint_{S_{cl}} \varphi_l(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \varphi_{l-1}^0(M^0) - \\
 & - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jil})}{\sigma(M^0) 2\pi} \oint_{Cl} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_l}{\partial n} dc = \varphi_l(M^0) n_{pi} M^0 \notin S_c;
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $G_{Sp,i}(M, M^0)$ – функция источника сейсмического поля, она совпадает с функцией выражения [Хачай О.А., Хачай А.Ю.,2018]. $k_{1jil}^2 = \omega^2(\sigma_{jil} / \lambda_{jil})$ – волновое число для распространения в упругой среде продольной волны. В приведенном выражении индекс ji обозначает принадлежность свойств внутри неоднородности, ja – вне неоднородности, $l=1 \dots L-1$ – номер иерархического уровня, $\vec{u}_l = grad \varphi_l$, – потенциал нормального сейсмического поля в слоистой среде в отсутствие неоднородности предыдущего ранга, если $l=2 \dots L$ $\varphi_l^0 = \varphi_{l-1}$, если $l=1$, $\varphi_l^0 = \varphi^0$, что совпадает с соответствующим выражением из (1).

Если при переходе на следующий иерархический уровень ось двухмерности не меняется, а меняются только геометрии сечений вложенных структур, то аналогично

[Хачай О.А., Хачай А.Ю.,2018] можно выписать итерационный процесс моделирования сейсмического поля (случай формирования только продольной волны). Итерационный процесс относится к моделированию вектора смещений при переходе с предыдущего иерархического уровня на последующий уровень. Внутри каждого иерархического уровня интегро-дифференциальное уравнение и интегро-дифференциальное представление вычисляются с помощью алгоритмов (1). Если на некотором иерархическом уровне структура локальной неоднородности распадается на несколько неоднородностей, то двойной и контурные интегралы в выражениях (1) берутся по всем неоднородностям. Если $l=L$, то внутри неоднородностей предыдущего иерархического уровня оказывается пористая флюидонасыщенная неоднородность. В этом случае система (1) с учетом [Френкель Я. И.,1944] переписывается в виде:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^I \left(\frac{k_{1jili}^2 - k_{1j}^2}{2\pi} \iint_{S_{cli}} \varphi_{li}(M) G_{Sp,j}(M_i, M_i^0) d\tau_{M_i} + \frac{\sigma_{ja}}{\sigma_{jili}} \varphi_{(l-1)i}^0(M_i^0) \right) - \\
& - \sum_{i=1}^I \left(\frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jili})}{\sigma_{jili} 2\pi} \oint_{C_{li}} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_{li}}{\partial n} dc_i = (\varphi_{li}(M_i^0) + \alpha_i p_{2i}) \right) n_{pi} M_i^0 \in S_{cli}; \\
& \sum_{i=1}^I \frac{\sigma_{jili} (k_{1jili}^2 - k_{1j}^2)}{\sigma(M^0) 2\pi} \iint_{S_{cl}} \varphi_{li}(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \varphi_{(l-1)i}^0(M^0) - \\
& - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jili})}{\sigma(M^0) 2\pi} \oint_{Cl} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_{li}}{\partial n} dc = \varphi_l(M^0) n_{pi} M^0 \notin S_{Cl}, \Pi_j; \\
& \frac{\sigma_{jil} (k_{1jil}^2 - k_{1j}^2)}{\sigma(M^0) 2\pi} \iint_{S_{cl}} \varphi_l(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \varphi_{l-1}^0(M^0) - \\
& - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jil})}{\sigma(M^0) 2\pi} \oint_{Cl} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_l}{\partial n} dc = \varphi_l(M^0) n_{pi} M^0 \notin S_{Cl}, \notin \Pi_j;
\end{aligned} \tag{2}$$

где $\alpha_i = 1 - \chi_i - \frac{K_i}{K_{0i}}$, $K_i = \lambda_i$ -модуль всестороннего сжатия, χ_i -пористость, K_{0i} -

истинный модуль сжимаемости i -ой фазовой структуры, поровое гидростатическое давление $p_{2i}, i=1, \dots, I$ -количество флюидонасыщенных структур.

Если $l=L+1$ и на следующем уровне неоднородность снова упругая то для дальнейшего продолжения итерационного процесса мы снова можем использовать выражения (1).

Однако очень часто резервуар, содержащий флюид, содержит либо упругие, либо пластичные пропластки. При этом, если флюид вода, то чаще всего это упругие пропластки, если нефть, то пропластки под влиянием акустического, либо механического воздействия пропитываются нефтью и они начинают проявлять пластические свойства.

Поэтому при моделировании распространения продольной волны при $l=L$ следует разделить слой j на несколько подслоев: $j^{(1)}$ -верхний пористый с иерархическими флюидонасыщенными областями, $j^{(2)}$ средний – упругий с пластическими областями, которые могут и не совпадать с верхними областями, третий $j^{(3)}$ - снова пористый с флюидонасыщенными областями, которые также могут быть смещены по горизонтали от первых и вторых областей. Таким образом к системе уравнений (2) необходимо добавить систему, учитывающую прохождение звуковой волны через пропластки [Хачай О. А., Хачай А. Ю.,2016] (3)-(5):

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^I \left(\frac{(k_{1jili}^2 - k_{1j}^2)}{2\pi} \iint_{Scli} \varphi_{li}(M) G_{Sp,j}(M_i, M_i^0) d\tau_{Mi} + \frac{\sigma_{ja}}{\sigma_{jili}} \varphi_{(l-1)i}^0(M_i^0) \right) - \\ & - \sum_{i=1}^I \left(\frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jili})}{\sigma_{jili} 2\pi} \oint_{Cli} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_{li}}{\partial n} dc_i = (\varphi_{li}(M_i^0) + \alpha_i p_{2i}) \right) n_{pu} M_i^0 \in S_{Cli} \in \Pi_j^{(j1)}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^I \left(\frac{(\sigma_{jili}(k_{1jili}^2 - k_{1j}^2))}{\sigma(M^0) 2\pi} \iint_{Scli} \varphi_{li}(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \varphi_{(l-1)i}^0(M^0) \right) - \\ & - \sum_{i=1}^I \left(\frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jili})}{\sigma(M^0) 2\pi} \oint_{Cli} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_{li}}{\partial n} dc_i \right) = \varphi_l(M^0) n_{pu} M^0 \notin S_{Cli}, \Pi_j^{(j1)}; \end{aligned}$$

$$k_{1jilm}^2 = \omega^2 (\sigma_{jilm} (\lambda_{jil} + \lambda'_{jilm} \omega_{1jilm}^0); \varphi_{(l-1)m}^0 = \varphi_l(M^0);$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \left(\frac{(k_{1jilm}^2 - k_{1j}^2)}{2\pi} \iint_{Sclm} \varphi_{lm}(M) G_{Sp,j}(M_m, M_m^0) d\tau_{Mm} + \frac{\sigma_{ja}}{\sigma_{jilm}} \varphi_{(l-1)m}^0(M_m^0) \right) - \\ & - \sum_{m=1}^M \left(\frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jilm})}{\sigma_{jilm} 2\pi} \oint_{Clm} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_{lm}}{\partial n} dc_i = \varphi_{lm}(M_m^0) \right) n_{pu} M_m^0 \in S_{Clm} \in \Pi_j^{(j2)}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=m}^M \left(\frac{(\sigma_{jilm}(k_{1jilm}^2 - k_{1j}^2))}{\sigma(M^0) 2\pi} \iint_{Scli} \varphi_{lm}(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \varphi_{(l-1)m}^0(M^0) \right) - \\ & - \sum_{m=1}^M \left(\frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jilm})}{\sigma(M^0) 2\pi} \oint_{Clm} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_{lm}}{\partial n} dc_m \right) = \varphi_l(M^0) n_{pu} M^0 \notin S_{Clm}, \Pi_j^{(j2)}; \end{aligned}$$

Если флюидонасыщенные области остаются теми же, мы возвращаемся к (3). Затем переходим к выражению (5) и вычисляем $\varphi_l(M^0) n_{pu} M^0 \notin S_{Cl}, \notin \Pi_j$; при условии $\varphi_{l-1}^0(M^0) = \varphi_l(M^0) n_{pu} M^0 \notin S_{Cli}, \Pi_j^{(j1)}; .$

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_{jil}(k_{1jil}^2 - k_{1j}^2)}{\sigma(M^0) 2\pi} \iint_{Scl} \varphi_l(M) G_{Sp,j}(M, M^0) d\tau_M + \varphi_{l-1}^0(M^0) - \\ & - \frac{(\sigma_{ja} - \sigma_{jil})}{\sigma(M^0) 2\pi} \oint_{Cl} G_{Sp,j} \frac{\partial \varphi_l}{\partial n} dc = \varphi_l(M^0) n_{pu} M^0 \notin S_{Cl}, \notin \Pi_j; \end{aligned} \quad (5)$$

Выводы

Таким образом, использование интегро дифференциальных уравнений для моделирования распространения поля в сложнопостроенной двухфазной среде позволяет конструировать и подстраивать алгоритм согласно необходимой сложности задачи.

Литература

Алексеев А. С., Цецохо В. А., Белоносев А. В., Сказка В. В. Вынужденные колебания трещиновато-блочных флюидонасыщенных слоев при вибросейсмических воздействиях: геомеханика // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2001. №.6. С.3–12.

Дрягин В. В. Использование вызванной акустической эмиссии коллекторов для обнаружения и извлечения углеводородов. // Георесурсы. 2018.Т.20.№.3.Ч.2. С.134–140. DOI: <https://doi.org/10/18599/grs.2018.3.134-140>.

Лавров А. В. Шкуратник В. Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор). // Акустический журнал.2005.Т.51.Приложение. С.6–18.

Френкель Я. И. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве. // Известия АН СССР, серия географическая и геофизическая.1944.Т.8.№.4. С.133–150.

Хачай О. А., Хачай А. Ю. Моделирование распространения сейсмического поля в слоисто-блоковой упругой среде с иерархическими пластическими включениями. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).2016. №.4. С. 318–326.

Хачай О.А., Хачай А.Ю. Акустический мониторинг слоисто-блоковых упругих сред с иерархическими составными физико-механическими включениями. // Современные проблемы механики. 2018. 33(3). С.44–50.

Computational and experimental studies of Acoustic Waves. Editor Mahmut Reyhanoglu. IntechOpen. Croatia. 2017a. 144 p. <http://dx.doi.org/10.5772/65135>.

Oil and Gas exploration. Methods and Application. Editors Said Gaci, Olga Hachay. AGU, Willey,USA. 2017b. 287p.

Numerical analysis of nonlinear coupled problems. Editors Hany Shehata,Youssef Rashed. Proceedings of the 1-st GeoMEast International Congress and Exhibition. 2019,July 5-19 Sharm EL-Sheikh, Egypt. Springer. 354p.