УДК 532.546:534.1

ВОЛНЫ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ, НАСЫЩЕННЫХ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИЕЙ

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

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Тюмень, Россия

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН на 2012 г. №25 «Фундаментальные проблемы механики и смежных наук в изучении многомасштабных процессов в природе и технике» и при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (Грант НШ - 6431.2012.1).

АННОТАЦИЯ

В работе исследуется процесс распространения и затухания акустических волн в пористой среде, насыщенной водонефтяной эмульсией. Водонефтяная эмульсия моделируется жидкостью с эффективной вязкостью. Показано, что пористая среда, содержащая водонефтяную эмульсию, характеризуется повышенным затуханием волн по сравнению с водо- или нефтенасыщенной пористой средой.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной задачи обусловлена тем, что при добыче нефти при вытеснении нефти водой в порах нефтяного пласта возможно образование водонефтяной эмульсии. Для повышения нефтеотдачи может применяться метод виброволнового воздействия на пласт и призабойную зону скважин. Для совершенствования технологий виброволнового воздействия необходимо знание закономерностей распространения и затухания волн в пористой среде, насыщенной водонефтяной эмульсией.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для численного исследования распространения и затухания волн в пористой среде, насыщенной водонефтяной эмульсией, выбрана двухскоростная модель насыщенной пористой среды, в рамках которой эмульсия моделируется как однородная ньютоновская жидкость с эффективной вязкостью.

В работе приняты обычные при исследованиях пористых сред допущения, и использованы обозначения монографий [1, 2].

Уравнения сохранения масс и импульсов фаз имеют вид:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla^l \left(\rho_f v_f^l \right) = 0$$

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla^l \left(\rho_s v_s^l \right) = 0$$

$$\rho_f \frac{d_f v_f^k}{dt} = -\alpha_f \nabla^k p_f - F^k$$

$$\rho_s \frac{d_s v_s^k}{dt} = -\alpha_s \nabla^k p_f + \nabla^l \sigma_{s*}^{lk} + F^k$$

где ρ_j, v_j, α_j - приведенная плотность, скорость, объемное содержание j - ой фазы, j = f, s; σ_{s*}, p_f - приведенное напряжение в скелете и давление во флюиде соответственно.

Выражение для межфазной силы имеет вид [1, 2]:

$$F = F_m + F_\mu + F_B$$

$$F_m = \frac{1}{2}\eta_m \alpha_s \alpha_f \rho^\circ_{f0}\left(\frac{d_f v_f}{dt} - \frac{d_s v_s}{dt}\right)$$

$$F_\mu = \eta_\mu \alpha_s \alpha_f \mu_f a_*^{-2}\left(v_f - v_s\right)$$

$$F_B = \eta_B \alpha_s \alpha_f a_*^{-1}\sqrt{2\rho^\circ_{f0}\mu_f \omega}(1+i)\left(v_f - v_s\right)$$

где ρ°_i - истинная плотность, a_* - характерный размер зерен скелета, μ_f - вязкость флюида, η_m, η_μ, η_B - безразмерные коэффициенты взаимодействия фаз, зависящие от структуры среды; . ω – частота, i - мнимая единица.

Скелет пористой среды предполагается упругим с модулями упругости λ_{s*}, μ_{s*}:

$$\sigma^{kl}_{s*} = \alpha_s\left(\lambda_{s*}\delta^{kl}\varepsilon^{mm}_s + 2\mu_{s*}\varepsilon^{kl}_s + \nu_{s*}\delta^{kl}p_f\right)$$

$$\nu_{s*} = \frac{\lambda_{s*} + 2/3\mu_{s*}}{\lambda_s + 2/3\mu_s}$$

$$\frac{\partial_s \varepsilon^{kl}_s}{\partial t} = \frac{1}{2}\left(\nabla^k v^l_s + \nabla^l v^k_s\right)$$

где ε_s - деформации твердой фазы.

Для каждой из фаз примем линейное уравнение состояния в акустическом приближении:

$$p_j - p_{j0} = K_j\left(\rho^\circ_j - \rho^\circ_{j0}\right)\Big/\rho^\circ_{j0}$$

$$\rho_j = \alpha_j \rho^\circ_j, \quad \alpha_s + \alpha_f = 1$$

где нижний индекс 0 означает невозмущенное значение величины, K_j - объемные модули упругости для материала j - ой фазы.

Для замыкания системы уравнений используем соотношения между истинными давлениями в фазах и эффективным давлением в скелете

$$p_{s*} = \alpha_s\left(p_s - p_f\right), \quad p_{s*} = -\frac{1}{3}\sigma^{mm}_{s*},$$

Предложенная система уравнений при заданных входящих в нее параметрах λ_{s*}, μ_{s*}, η_m, η_μ, η_B является замкнутой и позволяет исследовать волновые процессы во флюидонасыщенных пористых средах.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для расчетов были использованы параметры нефтей и водонефтяных эмульсий, взятые из экспериментальных данных работы [3].

Нефть или эмульсия моделировались ньютоновской однородной жидкостью с эффективной вязкостью.

Параметры нефтей и эмульсий, использованные в расчетах, приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры нефтей и эмульсий.

Вид нефти	s	$\rho^\circ i$, кг/м^3	μf, мПа·с	Kf, ГПа
Тобойское месторождение, скважина 11, T=20°C	0 0.1 0.3 0.5	837.3 853.57 886.11 918.65	15.96 24 28.5 90	1.2 1.26 1.39 1.56
Тобойское месторождение, скважина 11, T=30°C	0 0.1	837.3 853.57	10.148 14.686	1.2 1.26
Тагринское месторождение, скважина 1350, T=20°C	0 0.1	819.1 837.1	3.18 4.29	1.18 1.24

Получены и проанализированы дисперсионные зависимости. Также проанализировано влияние упругих свойств скелета пористой среды, водонасыщенности, температуры на скорость и затухание быстрой (деформационной) и медленной (фильтрационной) волн.

На Рис.1 показаны фазовая скорость и линейный декремент затухания быстрой и медленной волн в пористой среде, насыщенной водой, нефтью или водонефтяной эмульсией с различным водосодержанием.

На рисунках слева в расчетах взято λ_{s*}, μ_{s*} = 0.2 ГПа, справа – λ_{s*}, μ_{s*} = 2 ГПа.

Остальные параметры пористой среды следующие: материал скелета - кварц, ρ°_s = 2760 кг/м3, K_s = 36.6 ГПа, α_f = 0.4, a_* = 0.1 мм, η_m = 1, η_μ = 100, η_B = 1.5. Нефть Тобойского месторождения, скважина 11, T=20°C.

При увеличении значений упругих модулей скелета λ_{s*}, μ_{s*} возрастают скорости быстрой и медленной волн, а затухание быстрой волны в области высоких частот уменьшается. При увеличении водонасыщенности s на скорость распространения быстрой волны монотонно уменьшается, для медленной волны скорость при насыщении пористой среды эмульсией ниже, чем при насыщении водой или нефтью.

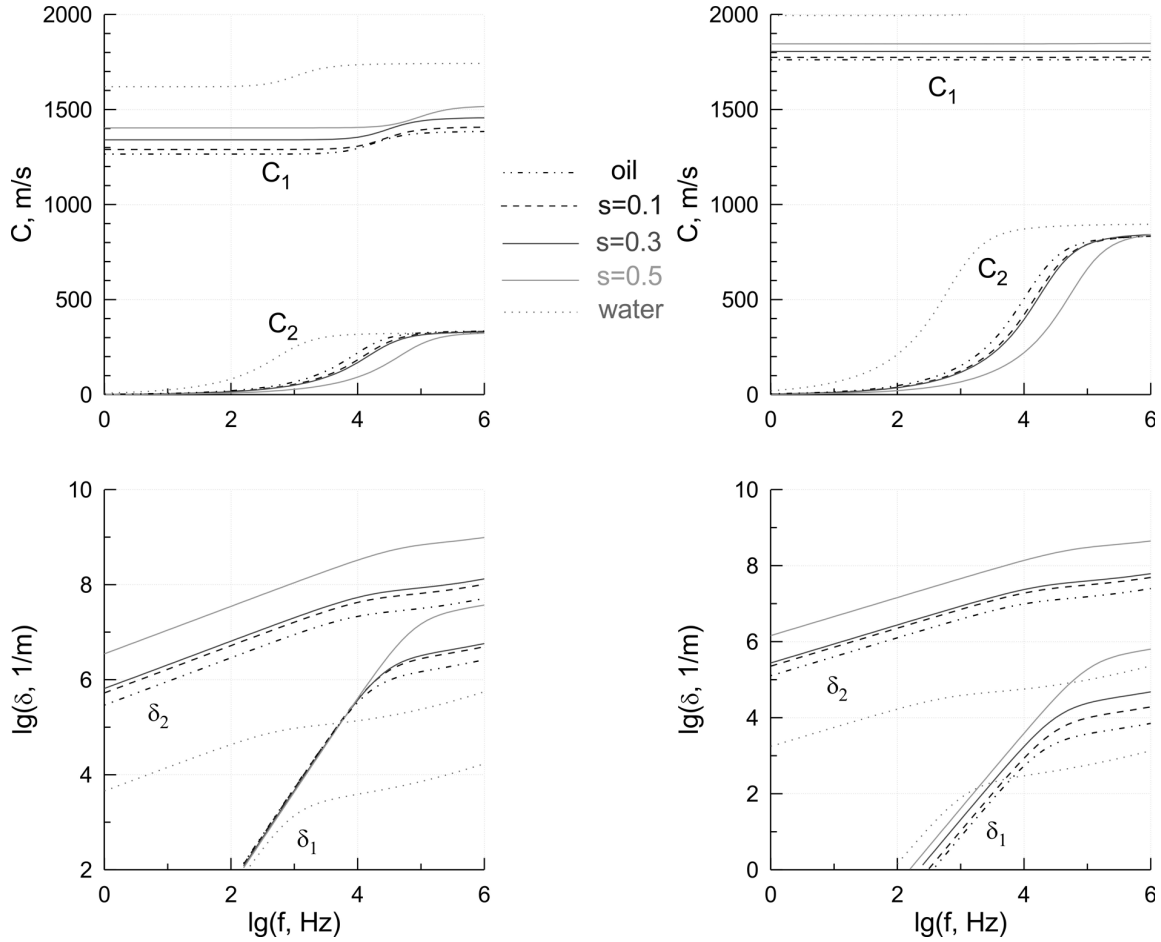

Рис.1 Фазовые скорости и линейный декремент затухания быстрой и медленной волн в пористой среде, насыщенной водой, нефтью или водонефтяной эмульсией с различным водосодержанием.

На затухание обеих волн влияние водонасыщенности немонотонное, т.е. при насыщении пористой среды эмульсией затухание происходит интенсивнее, чем в насыщенной водой или нефтью пористой среде.

На Рис.2,3 проиллюстрировано влияние температуры и вида нефти на скорости и затухание волн в пористой среде, насыщенной нефтью или водонефтяной эмульсией. В расчетах использовались значения упругих модулей скелета λ_{s*}, μ_{s*} = 0.2 ГПа, остальные параметры пористой среды те же, что и на Рис.1.

На Рис.2 в расчетах использовались параметры нефти и эмульсии Тобойского месторождения при s = 0.1, а на Рис.3 - нефти и эмульсий Тобойского и Тагринского месторождений при T=20°C.

Повышение температуры нефти незначительно изменяет скорость звука, но существенно уменьшает затухание: для быстрой волны - в области высоких частот, а для медленной - во всем рассмотренном частотном диапазоне (Рис.2).

В случае насыщения пористой среды более вязкой нефтью или эмульсией (нефть Тобойского месторождения) наблюдается более значительное затухание волн по сравнению с менее вязкой нефтью (Тагринского месторождения) (Рис.3).

Исследовано распространение треугольного импульса в пористой среде, насыщенной водой, нефтью или водонефтяной эмульсией. Расчеты проводились двумя методами: Фурье и Лакса-Вендроффа. Результаты расчетов показали хорошее совпадение.

На Рис.4 показано распространение импульса в пористой среде, насыщенной водой, нефтью или водонефтяной эмульсией (нефть Тобойского месторождения, T=20°C), рассчитанное методом Фурье. Начальный импульс треугольной формы (безразмерная амплитуда равна 1, длительность 1 мс) задается во флюиде (воде, нефти или водонефтяной

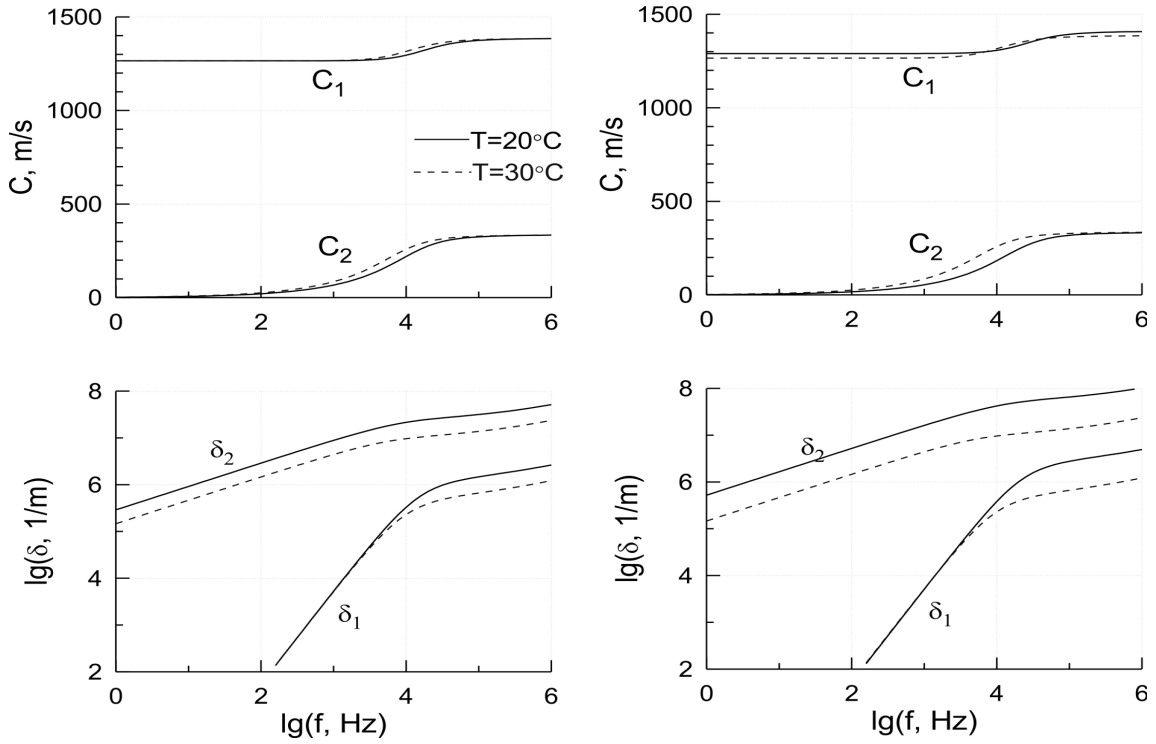

Рис.2 Фазовые скорости и линейный декремент затухания быстрой и медленной волн в пористой среде, насыщенной нефтью Тобойского месторождения (слева) или водонефтяной эмульсией (справа, s=0.1), при различных значениях температуры.

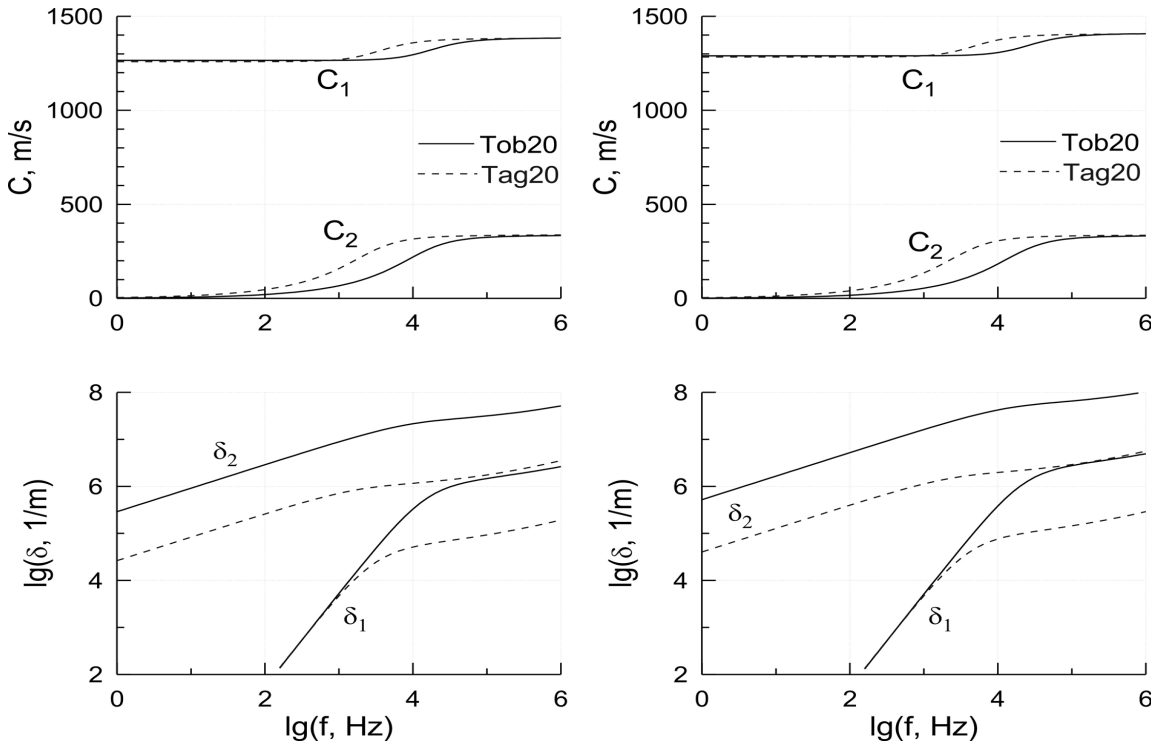

Рис.3 Фазовые скорости и линейный декремент затухания быстрой и медленной волн в пористой среде, насыщенной нефтями Тобойского (Tob20) и Тагринского (Tag20) месторождений (слева) и эмульсиями из этих же нефтей (справа, s=0.1).

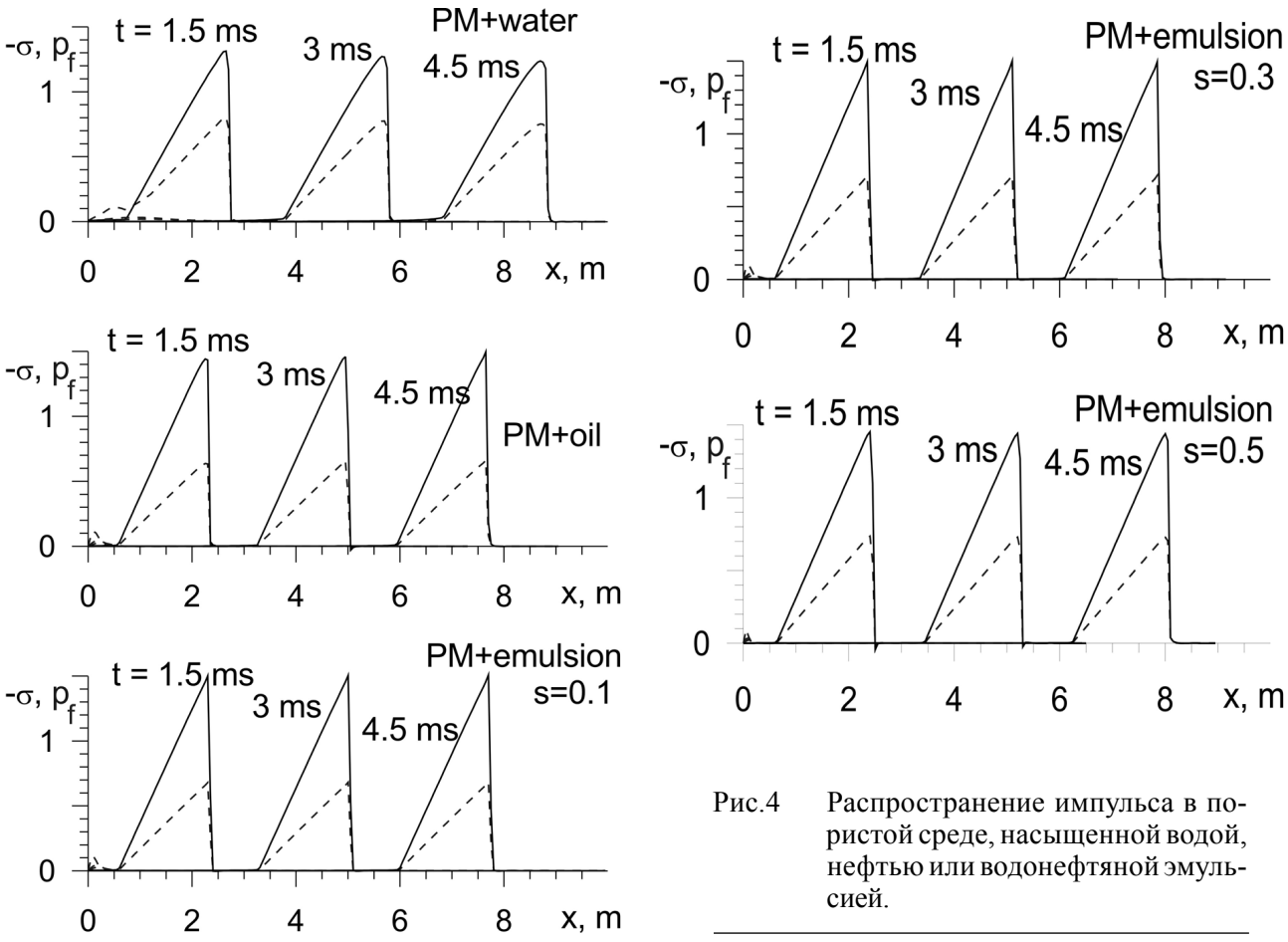

Рис.4 Распространение импульса в пористой среде, насыщенной водой, нефтью или водонефтяной эмульсией.

эмульсии) и проходит в пористую среду, насыщенную тем же флюидом, и имеющую параметры λ_{s*}, μ_{s*} = 2 ГПа, остальные параметры пористой среды те же, что и на Рис.1. Видно, что скорость распространения деформационной волны растет с увеличением водонасыщенности эмульсии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены и проанализированы дисперсионные зависимости. Проанализировано влияние упругих свойств скелета пористой среды, водонасыщенности, температуры на скорость и затухание деформационной и фильтрационной волн.

Исследовано распространение треугольного импульса в пористой среде, насыщенной водой, нефтью или водонефтяной эмульсией.

Установлено, что при увеличении водонасыщенности скорость распространения быстрой волны монотонно растет, скорость медленной волны при насыщении пористой среды эмульсией ниже, чем при насыщении водой или нефтью. Показано, что пористая среда, содержащая водонефтяную эмульсию, характеризуется повышенным затуханием волн по сравнению с пористой средой, насыщенной водой или нефтью.

ЛИТЕРАТУРА

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.
3. Отчёт о научно-исследовательской работе «Исследование влияния анакларида «рагена» на нефтеотдачу» Договор б/н, ООО «Реагент», Тюмень-2006 г.