

Численное моделирование волновых процессов в содержащей водонефтяную эмульсию пористой среде

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

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича СО РАН,
Россия, 625026, Тюмень, ул. Таймырская, 74, а/я 1507

(Статья поступила 14.11.2014; Подписана в печать 10.12.2014)

Численно исследовано распространение волн в насыщенной водонефтяной эмульсией пористой среде. Для описания движения пористой среды, содержащей эмульсию, используется двухскоростная с двумя напряжениями математическая модель. Эмульсия моделируется степенной жидкостью. В силе межфазного взаимодействия учитываются сила вязкого трения и сила присоединенных масс. Выполнены расчеты по эволюции возмущений в пористой среде, насыщенной водонефтяной эмульсией. Значения параметров эмульсии взяты из экспериментальных исследований других авторов. Проведено сравнение со случаями водо- и нефтенасыщенной пористой среды. Показано, что существует диапазон частот, в котором затухание в пористой среде, содержащей водонефтяную эмульсию, происходит сильнее, чем в водо- и нефтенасыщенной пористой среде. Для рассматриваемой водонефтяной эмульсии были получены оценки значений эффективной вязкости, построены дисперсионные кривые для линейных волн в пористой среде, содержащей водонефтяную эмульсию.

PACS: 43.25.+y, 47.56.+g, 62.30.+d УДК: 532.546:534.1

Ключевые слова: пористая среда, эмульсия, волны, затухание.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной задачи связана с широким применением эмульсий в различных процессах при добыче нефти. 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.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для исследования распространения и затухания волн в пористой среде, насыщенной водонефтяной эмульсией, выбрана двухскоростная модель насыщенной пористой среды [1, 2].

Уравнения сохранения масс и импульсов фаз имеют вид:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla^l (\rho_f v_f^l) = 0, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla^l (\rho_s v_s^l) = 0,$$

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

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

где ρ_j , v_j , α_j — приведенная плотность, скорость, объемное содержание j -ой фазы, $j = f, s$; σ_{s*} , p_f — при-

веденное напряжение в скелете и давление во флюиде соответственно.

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

$$\sigma_{s*}^{kl} = \alpha_s (\lambda_{s*} \delta^{kl} \varepsilon_s^{mm} + 2\mu_{s*} \varepsilon_s^{kl} + \nu_{s*} \delta^{kl} p_f),$$

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

$$\frac{\partial_s \varepsilon_s^{kl}}{\partial t} = \frac{1}{2} (\nabla^k v_s^l + \nabla^l v_s^k),$$

где ε_s — деформации твердой фазы.

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

$$p_j - p_{j0} = K_j (\rho_j^\circ - \rho_{j0}^\circ) / \rho_{j0}^\circ,$$

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

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

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

В рамках рассматриваемой модели эмульсия, в отличие от [3, 4], моделируется степенной жидкостью, ее реология описывается степенной зависимостью ($\tau = k\dot{\gamma}^n$). Межфазное взаимодействие включает силы

*E-mail: gubai@tmn.ru

†E-mail: timms@ikz.ru

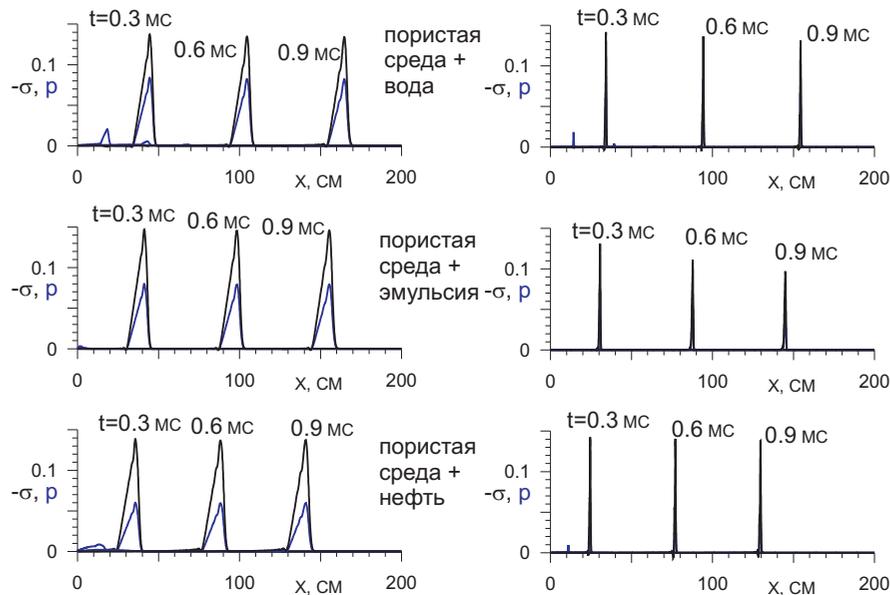


Рис. 1: Распространение импульса в пористой среде, насыщенной водой, нефтью или водонефтяной эмульсией (степенная жидкость, $k = 0,115$, $n = 1,02$). σ — полное напряжение, p — давление во флюиде

вязкого трения F_v и присоединенной массы F_m :

$$F = F_m + F_v,$$

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

$$F_v = \eta_v \alpha_s \alpha_f k a_*^{-(1+n)} (v_f - v_s)^n,$$

где ρ_i° — истинная плотность, a_* — характерный размер зерен скелета, η_m , η_v — безразмерные коэффициенты взаимодействия фаз, зависящие от структуры среды.

Приведенное выражение для силы вязкого трения F_v получено из решения задачи о стационарном течении степенной неньютоновской жидкости в плоской щели или цилиндрической трубе.

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

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Исследовано распространение треугольного импульса в пористой среде, насыщенной водой, нефтью или водонефтяной эмульсией. Расчеты проводились методом Лакса–Вендроффа.

На рис. 1 в качестве иллюстрации показано распространение импульса в пористой среде, насыщенной водой, водонефтяной эмульсией или нефтью. Основные параметры пористой среды: пористость равна 0,4, характерный размер пор — 0,1 мм, материал скелета — кварц. Нефть Тарасовского месторождения

($\rho = 800 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 3 \text{ мПа}\cdot\text{с}$), стабилизированная водонефтяная эмульсия из нефти Тарасовского месторождения [5] ($\rho = 959 \text{ кг/м}^3$, водосодержание 0,75, $k = 0,115 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$, $n = 1,02$). Начальный импульс треугольной формы (безразмерная амплитуда равна 0,1, длительность импульса на рисунках слева 0,07 мс, справа 0,007 мс) задается во флюиде (воде, водонефтяной эмульсии или нефти) и проходит в пористую среду, насыщенную тем же флюидом. При прохождении в пористую среду исходный импульс разделяется на быструю (деформационную) и медленную (фильтрационную) моды, при этом фильтрационная мода характеризуется малой скоростью и значительным затуханием. В водо- и нефтенасыщенной пористой среде после прохождения основной части импульса — быстрой волны, распространяющейся практически без искажения, в момент времени $t = 0,3 \text{ мс}$ наблюдается также медленная волна. Видно, что импульс большей длительности (слева) слабо затухает по мере распространения во всех трех случаях. Короткий импульс (справа) значительно затухает в водо- и нефтенасыщенной пористой среде, и заметно затухает в пористой среде, насыщенной эмульсией.

Для указанной водонефтяной эмульсии были сделаны оценки значения эффективной вязкости ($\mu = 65 \text{ мПа}\cdot\text{с}$), затем были рассчитаны дисперсионные зависимости для волн в пористой среде, содержащей водонефтяную эмульсию. Дисперсионные зависимости для линейных волн в пористой среде, содержащей нефть, воду или водонефтяную эмульсию, приведены на рис. 2 для различных значений эффективных модулей упругости скелета пористой среды (слева $\lambda_{s*} = \mu_{s*} = 0,2 \text{ ГПа}$, справа $\lambda_{s*} = \mu_{s*} = 2 \text{ ГПа}$). Показано, что в определенном диапазоне частот затухание

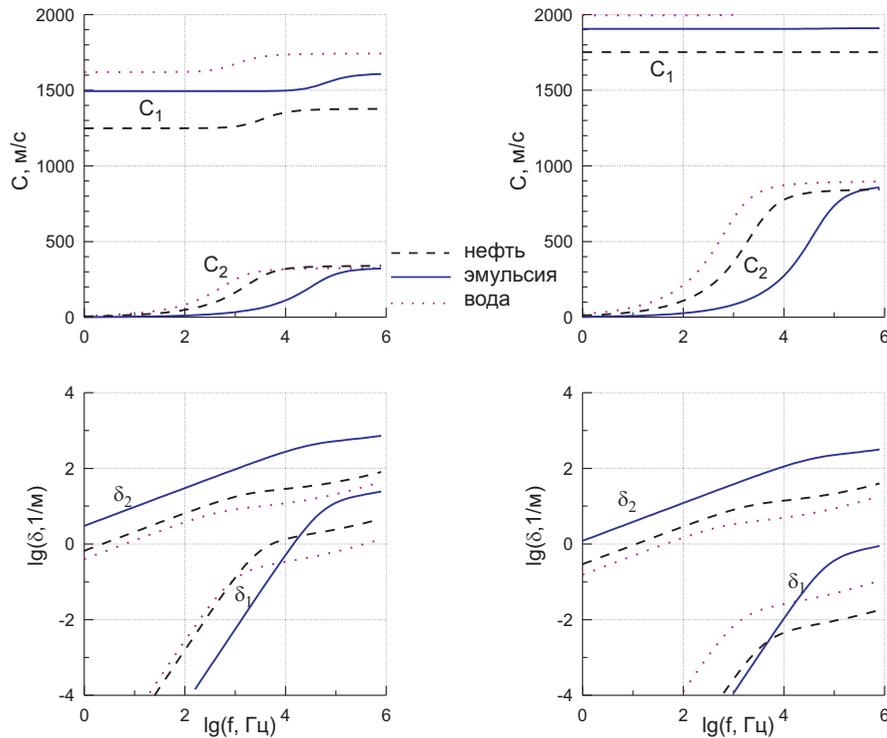


Рис. 2: Фазовые скорости и линейный декремент затухания деформационной и фильтрационной волн в пористой среде, насыщенной водой, нефтью Тарасовского месторождения или водонефтяной эмульсией из этой нефти

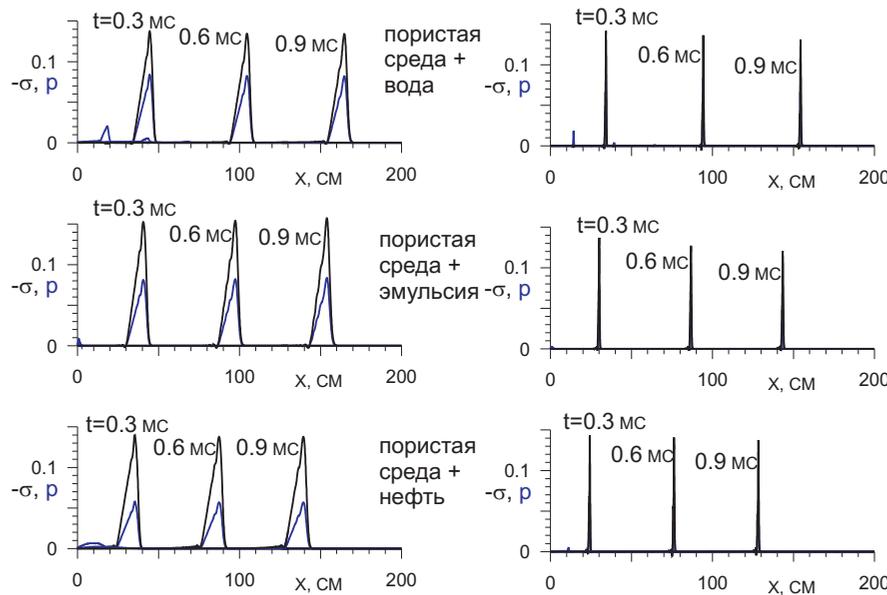


Рис. 3: Распространение импульса в пористой среде, насыщенной водой, нефтью или водонефтяной эмульсией (степенная жидкость, $k = 0,34$, $n = 0,62$). σ — полное напряжение, ρ — давление во флюиде

в пористой среде, содержащей водонефтяную эмульсию, происходит сильнее, чем в водо- и нефтенасыщенной пористой среде.

На рис.3 показано распространение треугольного импульса в пористой среде, насыщенной водой, эмульсией или деканом. Основные параметры пористой сре-

ды, амплитуды и длительности импульса те же, что и на рис. 1. Параметры углеводородной фазы (декан + эмульгатор, $\rho = 730 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 4 \text{ мПа}\cdot\text{с}$) и эмульсии ($\rho = 930 \text{ кг/м}^3$, водосодержание 0,74, $k = 0,34 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$, $n = 0,62$) взяты из работы [6].

Аналогично приведенным выше расчетам импульс

большей длительности (слева) слабо затухает по мере распространения во всех трех случаях. Короткий импульс существенно затухает в пористой среде, насыщенной эмульсией.

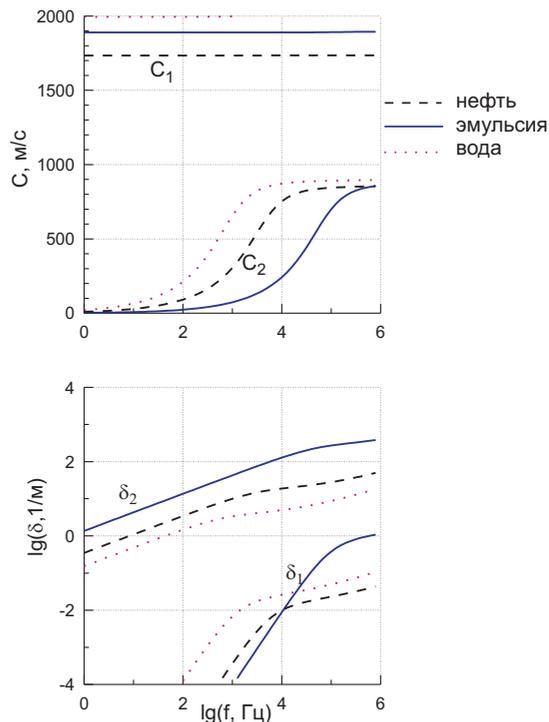


Рис. 4: Фазовые скорости и линейный декремент затухания деформационной и фильтрационной волн в пористой среде, насыщенной водой, деканом или эмульсией из декана

На рис. 4 представлены скорость и затухание для линейных волн в пористой среде, содержащей декан, воду или эмульсию (с оценкой эффективной вязкости для эмульсии $\mu = 80$ мПа·с). Данный расчет подтверждает предыдущий: при высоких частотах затухание волн в пористой среде, насыщенной эмульсией, может быть выше, чем в пористой среде, насыщенной водой или углеводородной фазой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе численно исследовано распространение волн в насыщенной водонефтяной эмульсией пористой среде. Для рассматриваемой водонефтяной эмульсии были получены оценки значений эффективной вязкости, построены дисперсионные кривые для волн в пористой среде, содержащей водонефтяную эмульсию.

Показано, что в определенном диапазоне частот затухание в пористой среде, содержащей водонефтяную эмульсию, происходит сильнее, чем в водо- и нефтенасыщенной пористой среде.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН на 2014 г. № 25 «Фундаментальные проблемы механики и смежных наук в изучении многомасштабных процессов в природе и технике».

- [1] Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. (М.: Наука, 1978). 336 с.
- [2] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. (М.: Наука, 1987). 464 с.
- [3] Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Исследование распространения и затухания волн в пористой среде, содержащей водонефтяную эмульсию. Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. Вып. 9. Материалы V Российской конференции с международным участием «Многофазные системы: теория и приложения», посвященной 20-летию со дня основания Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН (Уфа, 2–5 июля 2012). Часть II. С. 38. (Уфа: Нефтегазовое дело, 2012).
- [4] Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Волны в пористых средах, насыщенных водонефтяной эмульсией. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник научных статей. Выпуск 2(10). С. 96. (Киев: «НПВК Триакон», 2012).
- [5] Ахметов А.Т., Мавлетов М.В., Глухов В.В. Проблемы моделирования течения ивертных водонефтяных дисперсий в капиллярах. Труды Математического центра имени Н.И. Лобачевского. 27. Казанское математическое общество. Модели механики сплошной среды. Материалы XVII сессии Международной школы по моделям механики сплошной среды. С. 30. (Казань: Издательство Казанского математического общества, 2004).
- [6] Ахметов А.Т., Мавлетов М.В., Валиев А.А. Динамическое заклинивание и реология дисперсий при фазовом переходе. Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. Вып.8 (Под ред. С.Ф. Урманчева). С. 77. (Уфа: Нефтегазовое дело, 2011).

Numerical simulation of wave processes in porous medium containing emulsion

A.A. Gubaidullin^a, O.Yu. Boldyreva, D.N. Dudko^b

Tyumen Branch of Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Tyumen 625026, Russia
E-mail: ^agubai@tmn.ru, ^btimms@ikz.ru

Wave propagation in porous medium containing emulsion is numerically investigated. The two-velocity, two-stress mathematical model of porous medium is used. The power law constitutive relation for emulsion is taken. The viscous friction force and associated mass force are accounted in the interaction force between porous medium and emulsion. The pulse evolution in porous medium saturated with emulsion is calculated. The model parameters of the emulsion are taken from experimental investigations of the other authors. The calculation results on wave evolution are compared with that for the porous medium saturated with water and oil. It is shown that there is a frequency range where wave attenuation in porous medium saturated with emulsion is higher than attenuation in water or oil saturated porous medium. The effective viscosity estimates of the emulsion were made and the dispersion curves for linear waves in the porous medium containing emulsion were analyzed.

PACS: 43.25.+y, 47.56.+r, 62.30.+d

Keywords: porous medium, emulsion, waves, attenuation.

Received 14.11.2014.

Сведения об авторах

1. Губайдуллин Амир Анварович — докт. физ.-мат. наук, профессор, директор; тел.: (3452) 68-47-56, e-mail: gubai@tmn.ru.
2. Болдырева Ольга Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; e-mail: timms@ikz.ru.
3. Дудко Дина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник; e-mail: timms@ikz.ru.