Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), 24-31 мая 2018, г. Алушта. - М.: Изд-во МАИ, 2018. С.348-350. ISBN 978-5-4316-0491-1

МЕТОД РАСЧЕТА ДИНАМИКИ НЕУПРУГОЙ СЛОИСТОЙ СРЕДЫ

[1]Бураго Н.Г., [1]Журавлев А.Б., [2]Никитин И.С., [2]Никитин А.Д.

[1]Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского
[2] Институт автоматизации проектирования РАН

В данной работе исследуется уточненная модель слоистой среды с нелинейными вязкопластическими условиями проскальзывания на межслойных границах [1]. Физическим объектом, обладающим подобными свойствами, является, например, флюидосодержащий слоистый пакет в упругом геологическом массиве. Предполагается, что в тонких прослойках между упругими слоями находится очень вязкая жидкость (нефть), или вязкопластическая масса (песок, пропитанный нефтью). Подобные модели могут быть полезными при решении динамических задач сейсморазведки и интерпретации волновых картин, полученных в процессе ее проведения.

В декартовой прямоугольной системе координат x, y, z рассмотрим безграничную слоистую среду. Ось z перпендикулярна плоскопараллельным границам раздела упругих слоев, которые могут проскальзывать относительно друг друга с нелинейными (вязкопластическими) условиями скольжения. Постоянная толщина слоя $\varepsilon << 1$ является малым параметром. Система уравнений для описания слоистой среды с тонкими вязкопластическими прослойками примет вид [1]:

$$\rho u_{,t} = \sigma_{,x} + \tau_{,z} + \varepsilon^2 \mu \Omega_{,z}, \quad \rho v_{,t} = \tau_{,x} + s_{,z} + \varepsilon^2 \mu \Omega_{,x}$$

$$\sigma_{,t} = (\lambda + 2\mu) u_{,x} + \lambda v_{,z}, \qquad s_{,t} = \lambda u_{,x} + (\lambda + 2\mu) v_{,z}$$

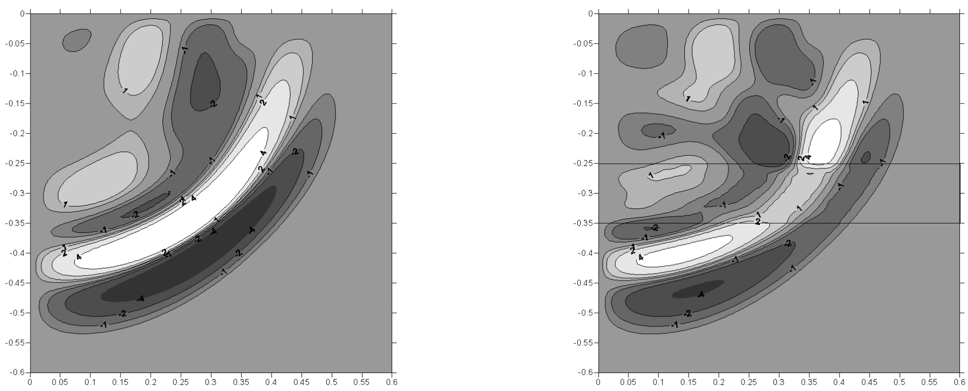
$$\tau_{,t} = \mu v_{,x} + \mu u_{,z} + \mu \varphi_{,t}, \qquad \varphi_{,t} = -(\tau / t_0) < F(\Delta) >) / \mu$$

$$\Omega_{,t} = -(g + \Omega)(\tau^2 / \tau_s^2)(< F(\Delta) > + 2 < F_{\Delta}^{/}(\Delta) >) / t_0$$

$$g = (\rho \varphi_{,tt} / \mu) - 4(\lambda + \mu)\varphi_{,xx} / (\lambda + 2\mu))/12, \quad \Delta = \tau^2 / \tau_z^2 - 1, \quad t_0 = 1/(\kappa\mu)$$

где $< F(y) >= F(y)H(y)$ - нелинейная функция, отличная от нуля за пределом текучести, и задающая условие вязкопластического проскальзывания, функции φ и Ω определяют скольжения на межслойных границах, u и v – компоненты скорости, σ, τ, s - компоненты тензора напряжений.

Для решения нестационарной системы уравнений слоистой среды с вязкопластическим проскальзыванием была разработана численная схема, основанная на явной аппроксимации уравнений движения и неявной аппроксимации определяющих соотношений, связанных с видом условий скольжения на межслойных границах. С использованием этой схемы была решена задача о нормальном воздействии на упругое полупространство с заглубленным слоистым пакетом. К полупространству прикладывался импульс смещений, сосредоточенный в достаточно узкой зоне на поверхности и действующий в течение короткого времени. Геометрические параметры расчетной области: максимальная глубина $H_{\max} = 1.00$, максимальный горизонт $X_{\max} = 1.00$, глубина залегания слоистого пакета $H_1 = 0.25$, толщина слоистого пакета $\Delta H = 0.10$, внешнее воздействие (импульс смещения) приложено на отрезке $0 \le x \le d$, $d = 0.02$. При этом на участке границы $z = 0$ задана вертикальная скорость $V(t) = V_0 \sin(2\pi t / T_0)$ при $x \le d$, $t \le T_0$, амплитуда сигнала $V_0 = 0.0035$, период (длительность) $T_0 = 0.10$. При $z = 0$: $\tau = 0$, при $x = d$: $\sigma = 0$. При $t > T_0$ граничное условие для скорости на отрезке $0 \le x \le d$ меняется на условие свободной поверхности $\sigma = 0$. Граничное условие на оси симметрии $x = 0$ имеет вид: $\tau = 0$, $u = 0$. На внешних границах области нормальные производные обращаются в ноль. От поверхности расходится система упругих цилиндрических волн, схематически повторяющая волновую картину известного решения плоской задачи Лэмба. По достижении слоистого пакета начинаются внутренние скольжения на межслойных границах, описываемые дополнительными распределенными функциями φ и Ω. Эти скольжения "снимают" касательные напряжения внутри слоя и изменяют волновую картину. На Рис. 1 представлены уровни касательного напряжения, радиальной и вертикальной скоростей, соответственно. На рисунках (а) изображены уровни, соответствующие отсутствию слоя, (б) – слой при $\varepsilon = 0.05$.

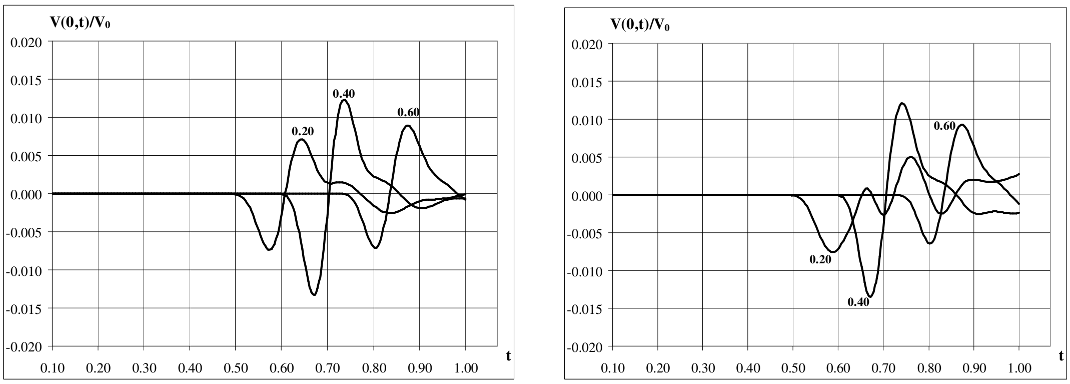


а) б)

Рис. 1. Касательное напряжение τ/τ_s, $t = 0.5$.

Заметно формирование отраженной от слоистого пакета волны в зоне между направлением z, где касательных напряжений нет в силу симметрии задачи, и отдаленных участков слоистого пакета, где касательные напряжения малы в силу радиального затухания квазицилиндрической волны от поверхностного источника.

На Рис. 2 приведены формы сигналов, пришедших в различные точки поверхности $z=0$, $x_1=0.2$, $x_2=0.4$, $x_3=0.6$ с волнами, отраженными от заглубленного слоистого пакета. Значения координат точек поверхности приведены рядом с каждым графиком нормированной скорости для отраженного сигнала.



а) б)

Рис. 2. Влияние слоистого пакета на отраженный сигнал на поверхности,
а) разность $(V_{\varepsilon=0.05}-V_{el})/V_0$, *б) разность* $(V_{\varepsilon=0.10}-V_{el})/V_0$

Из приведенных графиков видно, что учет членов порядка ε^2 в определяющих уравнениях модели приводит к достаточно существенному изменению формы отраженных волн при прохождении через слоистый флюидосодержащий пакет. Отраженные и дошедшие до поверхности сигналы специфической формы и направленности могут служить индикатором и средством обнаружения заглубленных флюидосодержащих слоистых пакетов в массиве упругой среды.

Выводы

Разработана численная схема решения нестационарной системы уравнений для слоистой среды с проскальзыванием, основанная на явной аппроксимации уравнений движения и неявной аппроксимации определяющих соотношений, связанных с видом условий скольжения на межслойных границах. Приведены примеры расчета прохождения упругой волны через флюидосодержащий слоистый массив. Определены формы и амплитуды прошедшей и отраженной волн.

Список литературы.

1. Nikitin I.S., Burago N.G., Nikitin A.D. Continuum Model of the Layered Medium with Slippage and Nonlinear Conditions at the Interlayer Boundaries// Solid State Phenomena. 2017. V. 258. Pp. 137-140.