

Соколов Д.С.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН В ВЯЗКОУПРУГОЙ МОДЕЛИ МОЗГОВОЙ ТКАНИ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Научный руководитель: ст. преп. Близнюк А.В.

Кафедра медицинской и биологической физики

Белорусский государственный медицинский университет, г. Минск

Актуальность. Ткань головного мозга относится к классу сверхмягких биологических материалов с модулем сдвига порядка 1 кПа и высоким содержанием воды (0,83 г/мл в сером веществе), что обуславливает её выраженное вязкоупругое поведение. Понимание закономерностей распространения и затухания механических волн в такой среде представляет значительный интерес для медицинской физики: разработки методов диагностики черепно-мозговых травм, магнитно-резонансной эластографии и биомеханического моделирования. Компьютерное моделирование позволяет получить фундаментальное представление о механизмах, лежащих в основе травм и патологических состояний, без проведения инвазивных экспериментов.

Цель: численное исследование распространения и затухания механических волн в одномерной вязкоупругой модели мозговой ткани и анализ влияния коэффициента затухания на динамику амплитуды.

Материалы и методы. Мозговая ткань рассматривалась как однородная вязкоупругая среда. Динамика смещений $u(x,t)$ описывалась волновым уравнением с диссипативным членом, пропорциональным скорости смещения: $\partial^2 u / \partial t^2 = c^2 \cdot \partial^2 u / \partial x^2 - \gamma \cdot \partial u / \partial t$, где $c = 1,2$ м/с – скорость волны, γ – коэффициент затухания, $\rho = 1050$ кг/м³ – плотность среды. На отрезке длиной $L = 0,1$ м задавалось синусоидальное начальное условие при нулевой начальной скорости и граничных условиях Дирихле. Численное решение получено явным трёхслойным методом конечных разностей (шаг $dx = 5 \cdot 10^{-4}$ м, $dt = 2 \cdot 10^{-4}$ с, число Куранта $CFL = 0,48 < 1$) с временем моделирования $T = 20$ с. Программная реализация выполнена на языке Python 3 с использованием библиотек NumPy и Matplotlib. Для сравнительного анализа рассматривались четыре значения коэффициента затухания: $\gamma = 0; 0,08; 0,16$ и $0,32$ м²/с.

Результаты и их обсуждение. При $\gamma = 0$ амплитуда волны оставалась постоянной на протяжении всего времени моделирования, что соответствует чисто упругой среде и подтверждает корректность реализованной схемы. При $\gamma > 0$ амплитуда убывала по экспоненциальному закону $A(t) = A_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot t)$, где коэффициент α линейно зависит от γ . При $\gamma = 0,16$ м²/с время полуспада амплитуды составило около 5,5 с, что соответствует характерным временам релаксации мозговой ткани по данным литературы. Увеличение γ вдвое сокращало время полуспада вдвое: при $\gamma = 0,32$ м²/с оно составило около 2,7 с, при $\gamma = 0,08$ м²/с – около 11,0 с. Скорость волны c влияла на частоту колебаний, однако не изменяла темп амплитудного затухания. Синусоидальный пространственный профиль волны сохранялся на протяжении всего моделирования, постепенно уменьшаясь по амплитуде. Полученные результаты согласуются с данными экспериментальных исследований биомеханики мозговой ткани.

Выводы. Амплитуда механической волны в вязкоупругой среде убывает по экспоненциальному закону, а коэффициент затухания линейно зависит от параметра γ . Явная разностная схема устойчива при $CFL = 0,48$, скорость волны влияет на частоту колебаний, но не на темп затухания. Разработанная модель корректно воспроизводит ключевые закономерности распространения механических волн в биологических мягких тканях и может служить основой для дальнейших исследований с учётом нелинейности и трёхмерной геометрии.