ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

**Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»,**

**посвященная 90-летию со дня рождения
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН
академика Виктора Евгеньевича Панина**

в рамках

**Международного междисциплинарного симпозиума
«Иерархические материалы: разработка и приложения
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года
Томск, Россия**

Томск
Издательство ТГУ
2020

DOI: 10.17223/9785946219242/384

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА В ПОРОУПРУГИХ СРЕДАХ
НА ОСНОВЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

¹Вершинин А.В., ²Шарапа М.

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

²Сколковский институт науки и технологий, Москва

В докладе рассматривается применение изопараметрического метода спектральных элементов (МСЭ) для численного решения задач полноволнового моделирования [5] в неоднородных областях сложной криволинейной формы с резко изменяющимися параметрами материала (включая разрывные). В качестве примера, рассмотрено решение задачи трехмерного акустического каротажа [1] в пороупругой среде, описываемой нестационарной моделью Био [6].

Рассмотрено 3 варианта граничных условий между скважинной жидкостью и пористой средой:

- 1) поры внутри твердого тела проницаемы для жидкости из скважины;
- 2) поры герметичны так, что жидкость в скважине не находится в непосредственном контакте с жидкостью в порах;
- 3) глинистая прослойка, присутствующая на границе между жидкостью внутри скважины и пористой средой моделируется с помощью упругой мембраны.

Для численного решения системы уравнений в частных производных, описывающих процессы акустического каротажа, использовался изопараметрический метод спектральных элементов [1-3], позволяющий осуществлять высокоточную дискретизацию как криволинейной геометрии скважины, так и волн, распространяющихся вблизи нее, с минимальными требованиями по числу точек дискретизации. Данный метод дискретизации основан на использовании криволинейных спектральных элементах высокого порядка, самосогласованных с порядком сеточной аппроксимации полиномами Лагранжа и порядком кубатурного интегрирования Гаусса-Лежандра-Лобатто (GLL). Каждый элемент локальной сетки представляет собой элемент объема из расчетной области, в котором уже во время работы алгоритма МСЭ расставляются точки интегрирования (GLL-точки). Функции формы являются прямыми произведениями интерполяционных многочленов Лагранжа для каждой из координатных осей. В случае изопараметрического МСЭ интерполяционные многочлены Лагранжа используются также для интерполяции функций внутри элемента.

На Рис. 1 приведено сравнение аналитического [7] и численного решений для случая высокочастотного излучателя в скважине, окруженной изотропной однородной пористой средой.

Рис. 1. Сравнение численного и аналитического решений (давление в скважине) в задаче об акустическом каротаже. Красный – общий случай уравнений Био (интеграл свертки). Синий – низкочастотное приближение (замена интеграла свертки рациональной функцией). Зеленый – аналитическое решение.

Отметим хорошее совпадение численного решения с аналитическим при точном расчете интеграла свертки в выражении для силы межфазного трения, в то же время низкочастотное приближение данного выражения приводит к значительной погрешности в решении.

Представляет интерес также проанализировать зависимость получаемого решения от жесткости упругой мембраны на границе между скважиной и пористой средой вокруг нее. На Рис. 2 приведены сейсмограммы давления для различных типов граничных условий.

Рис. 2. Эффект упругой оболочки на границе жидкость-пористая порода. Синий – открытые поры. Красный – упругая мембрана на границе жидкость-порода. Зеленый – закрытые поры.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-77-10062).

1. Charara Marwan, Vershinin Anatoly, Deger Evgeniya, Sabitov Denis, and Pekar Grigory. 3d spectral element method simulation of sonic logging in anisotropic viscoelastic media. In SEG Expanded Abstracts, volume 30, pages 432–437, 2011.
2. M. Charara, A. Vershinin, D. Sabitov, and G. Pekar. Sem wave propagation in complex media with tetrahedral to hexahedral mesh. In 73rd European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition, pages 41–45. Vienna, Austria, 2011.
3. Dmitriy Kononov, Anatoly Vershinin, Konstantin Zingerman, and Vladimir Levin. The implementation of spectral element method in a cae system for the solution of elasticity problems on hybrid curvilinear meshes. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2017:1–7, 2017.
4. V. S. Karpenko, A. V. Vershinin, V. A. Levin, and K. M. Zingerman. Some results of mesh convergence estimation for the spectral element method of different orders in fidesys industrial package. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 158:012049, 2016.
5. В. А. Левин, А. В. Вершинин, И. А. Мишин, А. М. Сбойчаков, and К. А. Петровский. Распространение линейных волн в нелинейно-упругих средах с начальными деформациями. Компьютерное моделирование с использованием программного комплекса прочностного инженерного анализа fidesys. Технологии сейсморазведки, (4):29–32, 2012.
6. M.A. Biot. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. *J. Acoust. Soc. Am.*, 28:168-191, 1956.
7. B.D. Plyushchenkov, and V.I. Turchaninov, Construction principles of the efficient finite difference scheme for the refined Biot's equations, *Poromechanics II*, Auriault et al (eds.), 2002 Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 394 8, 757-764 (2002).
8. JM Carcione, D Kosloff, R Kosloff Wave propagation simulation in a linear viscoelastic medium *Geophysical Journal International* 95 (3), 597-611