

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-9

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД С ЯВНЫМ ВЫДЕЛЕНИЕМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ****И. А. Митьковец<sup>а</sup>, Н. И. Хохлов<sup>б</sup>***Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
г. Долгопрудный, Российская Федерация**<sup>а</sup> mitkovets@phystech.edu, <sup>б</sup> k\_h@inbox.ru*

*Аннотация:* при моделировании распространения сейсмических волн в среде важной составляющей является учет разнообразных неоднородностей, так как они вносят существенный вклад в сейсмограммы, полученные в процессе реальных измерений. Основной идеей данной работы является использование наложенных сеток для описания различных неоднородностей, таких как трещины или незаполненные поры. Ожидается что данный подход позволит упростить построение сеток относительно альтернативных методов, таких как метод конечных элементов, а также позволит повысить точность.

*Ключевые слова:* сеточно-характеристический метод, метод наложенных сеток, неоднородности, трещины, пористая среда.

*Благодарности:* исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10028).

*Для цитирования:* Митьковец И. А., Хохлов Н. И. Моделирование неоднородных сред с явным выделением неоднородностей сеточно-характеристическим методом. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):58–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-9.

**SIMULATION OF INHOMOGENEOUS MEDIA WITH EXPLICIT IDENTIFICATION OF INHOMOGENEITIES BY THE GRID-CHARACTERISTIC METHOD****I. A. Mitskovets<sup>а</sup>, N. I. Khokhlov<sup>б</sup>***Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny,  
Russian Federation**<sup>а</sup> mitkovets@phystech.edu, <sup>б</sup> k\_h@inbox.ru*

*Abstract:* a key aspect of simulating seismic waves propagation in a medium is the consideration of various inhomogeneities, since significantly affect the actual seismograms. The concept of this work is the use of superimposed grids to define various inhomogeneities such as cracks or unfilled pores. It is expected that this approach will simplify meshing compared to alternative methods such as the finite element method, and improve accuracy.

*Keywords:* grid-characteristic method, superimposed grid method, inhomogeneities, cracks, porous medium.

*Acknowledgements:* this study is supported by the Russian Science Foundation grant (project No. 20-71-10028).

*Cite this article:* Mitskovets I. A., Khokhlov N. I. Simulation of Inhomogeneous Media with Explicit Identification of Inhomogeneities by the Grid-Characteristic Method. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(1):58–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-9.

Рассматривается применение сеточно-характеристического метода [1] в комбинации с методом наложенных сеток в целях учета неоднородностей среды. В данной работе демонстрируются способы описания трещин и отверстий при помощи описывающих их наложенных сеток. Описание моделируемых отверстий осуществляется посредством наложения криволинейной сетки, а для учета трещин применяется регулярная прямоугольная наложенная сетка. В обоих случаях для моделирования остальной однородной среды используется регулярная прямоугольная сетка. Рассматриваемая задача – это распространение динамических волновых возмущений в неоднородных средах, с учетом пор и трещин соответственно, в упругой модели.

Эта работа основывается на идее использования наложенных сеток как средства локализации модификаций, применяемых к классическому сеточно-характеристическому методу для описания неоднородностей. Используя множество неоднородностей с различными параметрами при создании модели среды, мы таким образом создаем пористые и трещиноватые среды.

В случае моделирования отверстий такой модификации появляется криволинейная сетка со свободной поверхностью, возможность интерпретации между ней и основной сеткой позволяет нам создавать замкнутые свободные поверхности внутри регулярной прямоугольной сетки. Альтернативой данного подхода является использование неструктурных сеток в методе спектральных элементов или использование сеток с лестничной границей. По сравнению с первым альтернативным методом ожидается, что наш подход значительно упростит построение сеток. А по сравнению со вторым наш подход должен увеличить точность результатов.

Для задания единичной трещины также используется единичная наложенная сетка, которая моделирует трещину. Метод, используемый для моделирования трещины, описанный в [2], требует, чтобы сетка обладала соосностью с моделируемой ею трещиной, использование наложенной сетки позволяет задавать трещины произвольной ориентации относительно основной прямоугольной регулярной сетки. Альтернативный метод задания моделирования трещин, не обладающих соосностью относительно основной регулярной сетки, с использованием множества более мелких трещин, обладающих соосностью, и без использования наложенных сеток описан в [2].

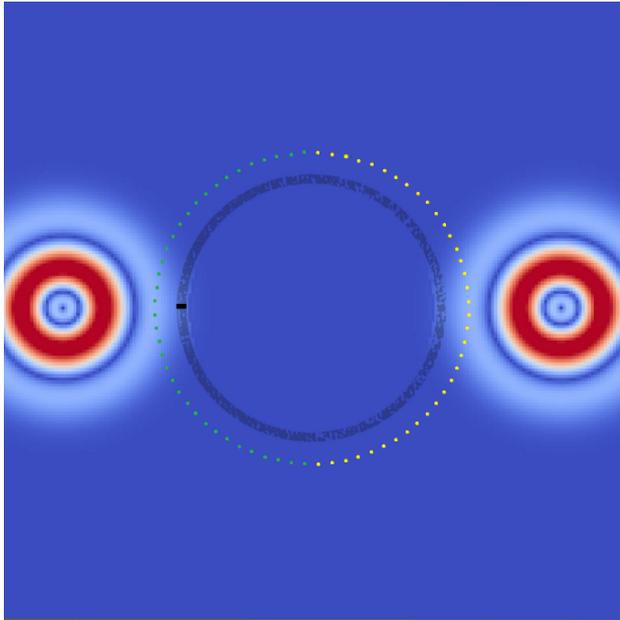
Валидация метода, в случае моделирования одного отверстия, в данной работе была произведена посредством тестового расчета, моделирующего распространение возмущений от двух идентичных источников возмущений, запущенных одновременно и расположенных симметрично относительно центра отверстия. Возмущения, порождаемые данными источниками, определяются импульсом Риккера с частотой 15 Гц. Регулярная прямоугольная сетка, используемая для валидации, имеет размер  $200 \times 200$  узлов, размером  $5 \times 5$  метров каждый. Криволинейная сетка, которая формирует собой отверстие, имеет размер  $407 \times 5$  и характерный размер ячейки 3 метра. Характеристики среды, в которой располагается отверстие, следующие:  $C_s = 2850$  м/с;  $C_p = 1650$  м/с;  $\rho = 2400$  кг/м<sup>3</sup>. Моделирование проведено в течение 0.5 секунд с шагом  $\Delta t = 0.1$  мс. На рис. 1 приведена постановка данного эксперимента.

Поскольку среди общедоступных разработок не удалось найти модель, описывающую круглое отверстие в выбранной нами постановке задачи, было решено прибегнуть к свойствам симметричности отверстий и попарно симметричным, переходящим друг в друга после поворота на 180 градусов источникам, образующим кольцо вокруг отверстия. По норме MAE, отраженной на рис. 2, относительная разность показаний симметричных источников не превышает 1,8 %.

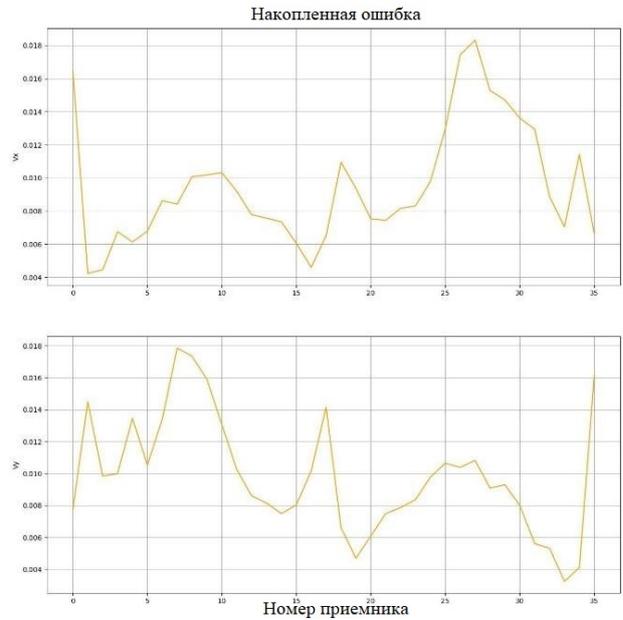
Валидация метода в случае моделирования трещины в данной работе была проведена на ряде синтетических расчетов с целью исследования зависимости изменения ошибки расчетов от угла поворота наложенной сетки, задающей трещину. Возмущения, порождаемые данными источниками, определяются импульсом Риккера с частотой 15 Гц. Регулярная прямоугольная сетка, используемая для исследования, имеет размер  $400 \times 400$  узлов,  $2 \times 2$  м каждый. Наложённые сетки имеют размер  $32 \times 13$ , размер их ячеек  $2 \times 2$  м. Сплошная среда имеет следующие характеристики:  $C_s = 2850$  м/с;  $C_p = 1650$  м/с;  $\rho = 2400$  кг/м<sup>3</sup>. В работе проведено моделирование распространения динамических волновых возмущений в течение 0.75 секунд с шагом  $\Delta t = 0.3$  мс.

Постановка экспериментов на примере одного из углов поворота представлена на рис. 3. Синим цветом отмечены не повернутая трещина и соответствующие ей 72 приемника, а зеленым — повернутая трещина и повернутые на тот же угол приемники. Зависимость относительной погрешности при попарном сравнении не повернутого и соответствующего ему повернутого источника по норме MAE от угла поворота отражена на рис. 4, как видно, она не превышает 11,1 %.

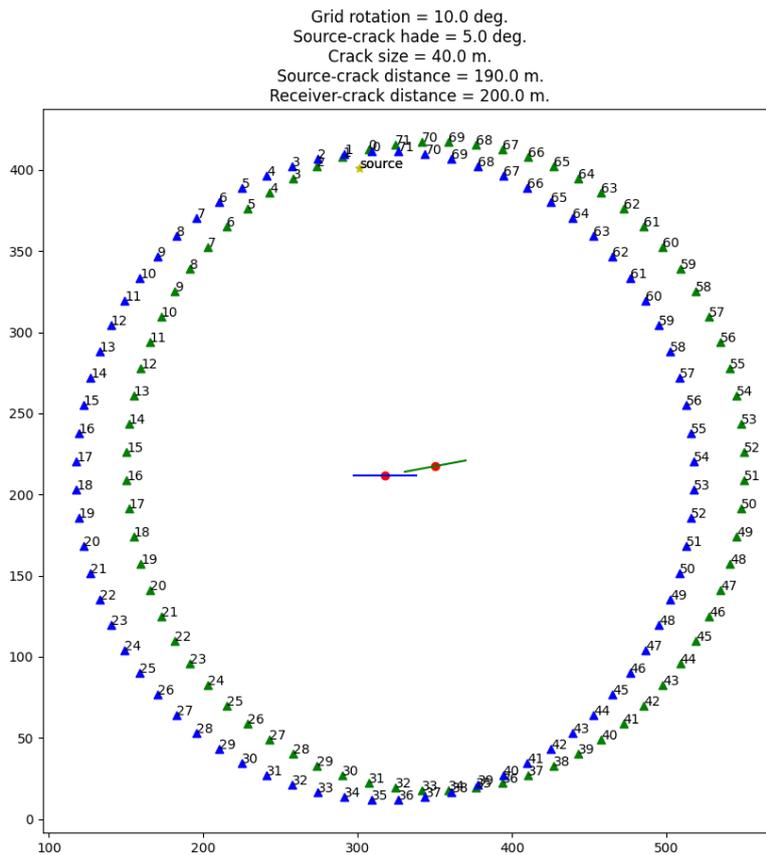
Пример использования данного подхода для моделирования пористой среды см. на рис. 5. В приведенных там расчетах среда различной пористости создается посредством описания ее как сгруппированного множества круглых отверстий со свободной границей внутри. Полученные в результате моделирования распространения плоской волны через описанную структуру волновые картины отображены на рис. 5. Регулярная прямоугольная сетка имеет размер  $400 \times 360$  узлов,  $5 \times 5$  м каждый. Размеры сеток, описывающих отверстия, варьируются от  $63 \times 5$  до  $125 \times 5$  узлов, характерный размер их ячеек 3–5 м. Сплошная среда имеет следующие характеристики:  $C_s = 2850$  м/с;  $C_p = 1650$  м/с;  $\rho = 2400$  кг/м<sup>3</sup>. Моделирование проведено в течение 0.6 секунд с шагом  $\Delta t = 0.1$  мс.



**Рис. 1.** Иллюстрация постановки задачи, цветами выделены симметрично расположенные приемники

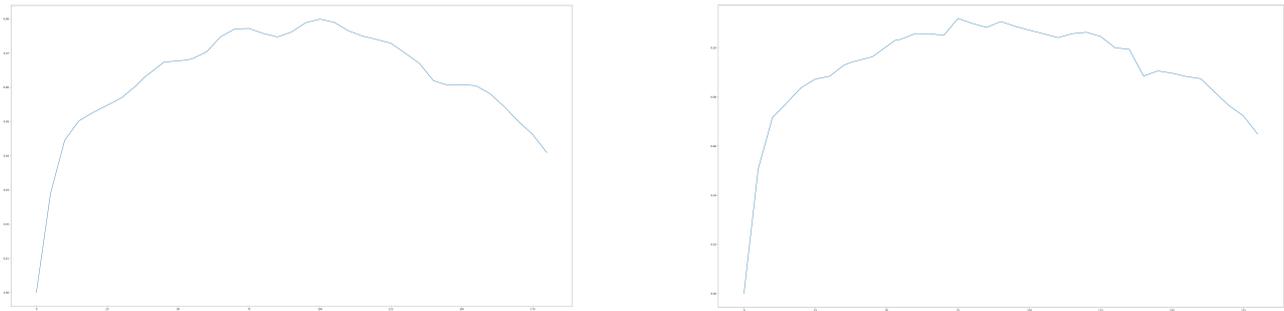


**Рис. 2.** Накопленная ошибка при попарном сравнении показаний на приемниках

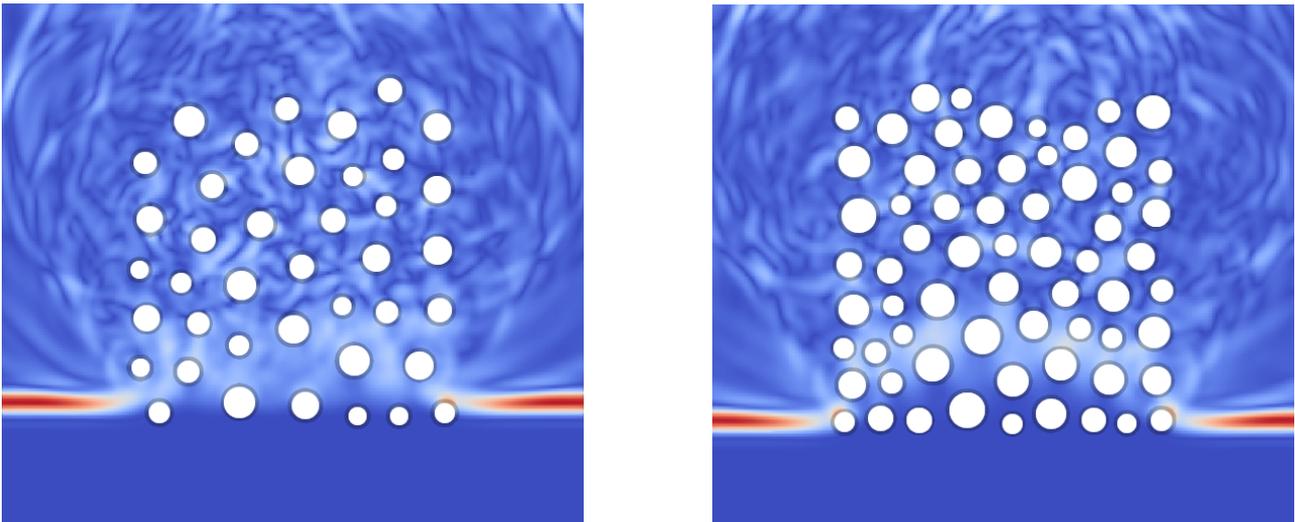


**Рис. 3.** Примеры эквивалентных конфигураций трещин и приемников

В качестве демонстрации работы предложенного метода было выполнено моделирование распространения волн в среде, содержащей трещины. Описание и параметры среды взяты из [3]. Распределение плотности в среде и контуры наложенных сеток, содержащих трещины, представлены на рис. 6. Источник возмущений точечный, описывается импульсом Риккера частотой 15 Гц. Результат произведенного моделирования в виде волновых картин представлен на рис. 7. Основная регулярная

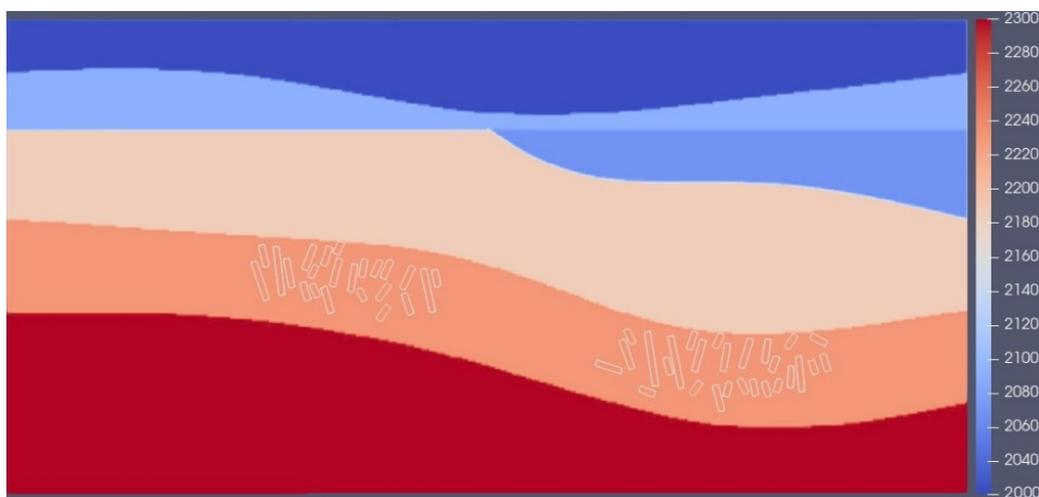


**Рис. 4.** Зависимость накопленной ошибки от угла поворота

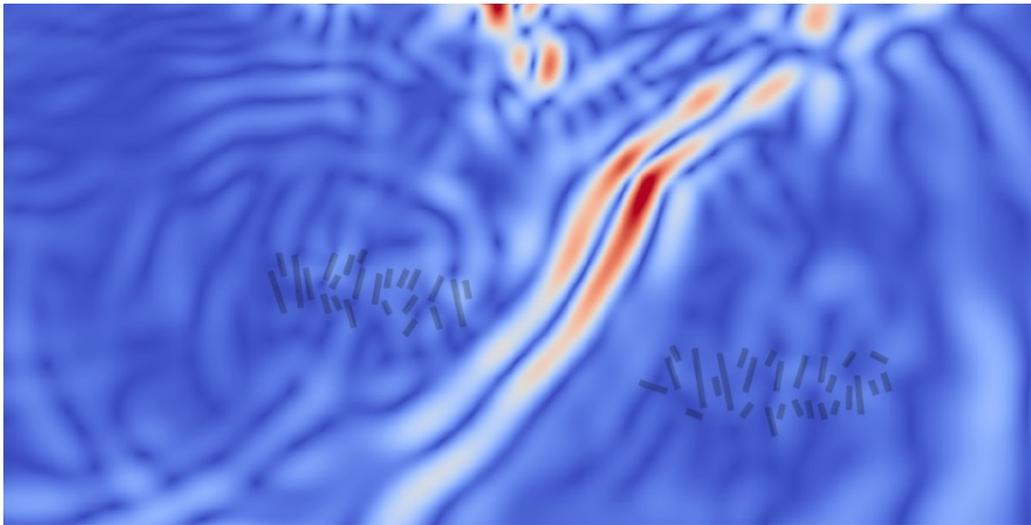


**Рис. 5.** Волновые картины, полученные в ходе моделирования распространения плоской волны в среде с меньшим (а) и большим (б) количеством пор

сетка имеет размер  $1280 \times 638$  узлов,  $0.78125 \times 0.78125$  м каждый узел. Размеры сеток, описывающих отверстия, варьируются от  $19 \times 9$  до  $74 \times 9$  узлов, размеры ячеек порядка 0.78 м. Моделирование проведено в течение 0.5 секунд с шагом  $\Delta t = 0.1$  мс. Распределение продольной и поперечной скорости соответствует постановке задачи в [3].



**Рис. 6.** Расположение наложенных сеток, используемых для учета трещин в демонстрационном расчете



**Рис. 7.** Волновая картина, полученная в демонстрационном расчете в трещиноватой среде с точечным источником

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Магомедов К. М., Холодов А. С. *Сеточно-характеристические численные методы*. М.: Наука, 1988.
2. Khokhlov N., Stognii P. Novel Approach to Modeling the Seismic Waves in the Areas with Complex Fractured Geological Structures. *Minerals*. 2020;10:122.
3. Cho Y., Gibson R. L., Vasilyeva M. V., Efendiev Y. Generalized Multi-Scale Finite Elements for Simulation of Elastic Wave Propagation in Fractured Media. *Geophysics*. 2018;83:9.