

УДК 519.63

ОБ УЧЁТЕ ВОДОНАСЫЩЕННОСТИ ДОННЫХ ОСАДКОВ
В ЗАДАЧЕ МОРСКОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИВ. И. Голубев^{1,2,*}, А. В. Шевченко¹, член-корреспондент РАН И. Б. Петров^{1,2}

Поступило 17.06.2019 г.

Рассматривается задача численного моделирования сейсмического отклика от морского дна. Для описания динамического поведения водного слоя используются акустические уравнения. Слой донных осадков описывается пористой флюидонасыщенной средой. Для этого используется система уравнений Доровского. Предложен алгоритм, позволяющий в рамках единого сеточно-характеристического подхода для решения гиперболических систем уравнений провести полноволновое моделирование во всём расчётном объёме. Его отличительной особенностью является постановка в явном виде необходимых контактных условий на границе между средами с различной реологией.

Ключевые слова: математическое моделирование, сеточно-характеристический метод, сейсморазведка, пористые среды, модель Доровского.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524883248-252>

ВВЕДЕНИЕ

Сейсморазведка является наиболее распространённым методом поиска и разведки месторождений нефти и газа. При этом открытие нетрадиционных месторождений нефти и газа требует разработки новых методик, способных успешно выполнять их оконтуривание и проводить оценку имеющихся запасов. В этом может существенно помочь математическое моделирование, способное предоставить синтетические сигналы-отклики от реалистичных моделей с заданной внутренней структурой.

Основным сдерживающим фактором в развитии методик численного моделирования распространения сейсмических волн в геологических средах выступало ограничение на скорость расчётов. В связи с бурным развитием высокопроизводительных вычислительных систем в значительной мере это ограничение было снято. Так, например, хороший обзор по современным вычислительным методам решения задачи миграции представлен в работе [1]. Отметим, что рассматриваемая прямая задача — волновая, т.е. система уравнений относится к гиперболическому типу. Для её численного решения может быть успешно применён сеточно-характеристический численный метод [2, 3], учитывающий внутреннюю математическую структуру задачи — распространение разрывов вдоль характеристик. С его помощью

ранее уже были получены волновые картины в акустических [4], упругих [5], слоистых и трещиноватых средах [6–8]. Он также был успешно применён для решения обратной задачи миграции [9].

В настоящей работе рассматривается задача шельфовой сейсмической разведки. Целью исследования является разработка подхода, позволяющего явно учесть водонасыщенность слоя донных осадков. В работе строится двумерная модель шельфового региона. При этом слой воды описывается в рамках акустических уравнений. Для описания поведения пористой среды используется модель Доровского [10]. В расчётном алгоритме в явном виде используются контактные условия между водой и дном [11–14]. Для численного решения системы используется сеточно-характеристический метод на прямоугольных расчётных сетках.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Уравнения, описывающие динамическое поведение бесконечно малого объёма акустической среды, могут быть записаны в виде

$$\rho_a \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}_a = -\nabla p_a, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} p_a = -c_a^2 \rho_a \nabla \cdot \mathbf{v}_a, \quad (2)$$

где ρ_a — плотность жидкости, c_a — скорость распространения акустической волны, \mathbf{v}_a — вектор скорости жидкости, p_a — давление в жидкости.

Уравнения, описывающие динамическое поведение бесконечно малого объёма изотропной линейно-упругой среды, могут быть записаны в виде

¹Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московской обл.

²Федеральный научный центр Научно-исследовательский
институт системных исследований
Российской Академии наук, Москва

*E-mail: w.golubev@mail.ru

$$\rho_e \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}_e = \nabla \cdot \sigma_e, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sigma_e = \lambda (\nabla \cdot \mathbf{v}_e) I + \mu (\nabla \otimes \mathbf{v}_e + \mathbf{v}_e \otimes \nabla), \quad (4)$$

где ρ_e – плотность среды, σ_e – тензор напряжений, \mathbf{v}_e – вектор скорости среды, λ и μ – упругие параметры Ламе.

В действительности донные осадки ввиду непосредственного продолжительного контакта с водой насыщаются ей. В таком случае корректнее учитывать этот факт при выборе математической модели их динамического нагружения. В работе для этого используется модель Доровского. Уравнения, описывающие динамическое поведение бесконечно малого объёма насыщенной пористой среды, могут быть записаны в виде

$$\rho_s \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}_s + \nabla \cdot h_s + \frac{\rho_s}{\rho_0} \nabla p_f = 0, \quad (5)$$

$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v}_f + \nabla p_f = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} h_s + \mu (\nabla \otimes \mathbf{v}_e + \mathbf{v}_e \otimes \nabla) + I \left(\left(\frac{\rho_f}{\rho_0} K - \frac{2}{3} \mu \right) \nabla \cdot \mathbf{v}_s - \frac{\rho_f}{\rho_0} K \nabla \cdot \mathbf{v}_f \right) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} p_f - (K - \alpha \rho_0 \rho_s) \nabla \cdot \mathbf{v}_s + \alpha \rho_0 \rho_f \nabla \cdot \mathbf{v}_f = 0, \quad (8)$$

где h_s и \mathbf{v}_s – величина, равная минус тензору напряжений скелета σ_s , и вектор скорости скелета, p_f и \mathbf{v}_f – давление и вектор скорости флюида, $\rho_0 = \rho_s + \rho_f$, и ρ_f и ρ_s – удельные плотности флюида и скелета, а K , μ , α – упругие характеристики насыщенной пористой среды.

Все приведённые выше системы уравнений являются гиперболическими и могут быть записаны в каноническом виде. После проведения расщепления по направлениям каждая из них может быть решена сеточно-характеристическим методом с переходом в инварианты Римана.

На границе между акустической и упругой средами должно быть задано необходимое число контактных условий – по числу выходящих из сред на границу характеристик. В двумерном случае – три, в трёхмерном – четыре. Они формулируются в виде непрерывности полного тензора напряжений и нормальной компоненты скорости движения:

$$(\sigma_e \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} = -p_a, \quad (9)$$

$$(\sigma_e \cdot \mathbf{n}) \cdot \boldsymbol{\tau} = 0, \quad (10)$$

$$\mathbf{v}_e \cdot \mathbf{n} = \mathbf{v}_a \cdot \mathbf{n}, \quad (11)$$

где \mathbf{n} – вектор нормали, направленный из упругой среды в акустическую среду, а $\boldsymbol{\tau}$ – вектор, касательный к поверхности контакта сред.

На границе между акустической и пористой средами в двумерном случае должно быть задано четыре контактных условия, а в трёхмерном – пять. Они формулируются в следующем виде:

$$(1 - \phi) \mathbf{v}_s \cdot \mathbf{n} + \phi \mathbf{v}_f \cdot \mathbf{n} = \mathbf{v}_a \cdot \mathbf{n}, \quad (12)$$

$$(-h_s \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} - p_f = -p_a, \quad (13)$$

$$(-h_s \cdot \mathbf{n}) \cdot \boldsymbol{\tau} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\rho_f}{\phi \rho_0} p_f = p_a, \quad (15)$$

где \mathbf{n} – нормаль, направленная из пористой среды в акустическую среду, ϕ – пористость среды, \mathbf{v}_f – вектор скорости флюида, \mathbf{v}_s – вектор скорости скелета, p_f – давление флюида, h_s – тензор напряжений скелета, $h_s = -\sigma_s$.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе рассматривалась задача распространения акустической волны от пневмопушки в толще морской воды в двумерной постановке и её отражение от подстилающего дна – донных осадков. Область моделирования представляла собой параллелепипед размерами 1000×300 м. Верхний слой воды имел мощность 250 м, мощность дна была 50 м [15]. Для описания динамического поведения жидкости использовались акустические уравнения со следующими параметрами: скорость акустических волн – 1500 м/с, плотность – 1000 кг/м³. Слой донных осадков описывался в рамках модели Доровского с параметрами $\mu = 2,2815 \cdot 10^9$ Н/м², $\alpha = 2507,905873$ м⁵/кг/с², $K = 2,642306867 \cdot 10^9$ Н/м², $\rho_s = 1350$ кг/м³, $\rho_f = 100$ кг/м³, $\phi = 10\%$. Они соответствуют следующим скоростям распространения волн: $C_{p1} = 2000$ м/с, $C_{p2} = 450$ м/с, $C_s = 1300$ м/с.

На границе между водой и донными осадками в явном виде задавались приведённые в работе граничные условия. Для моделирования импульса, испускаемого пневмопушкой, использовался точечный источник, расположенный на глубине 3 м, со временной зависимостью в виде импульса Рикера с частотой 30 Гц. На практике гидрофоны закрепляются либо на плавающих в приповерхностном слое косах, либо на донных косах. В месте их расположения регистрируется значение давления. В расчётах данные записывались вдоль всей области модели-

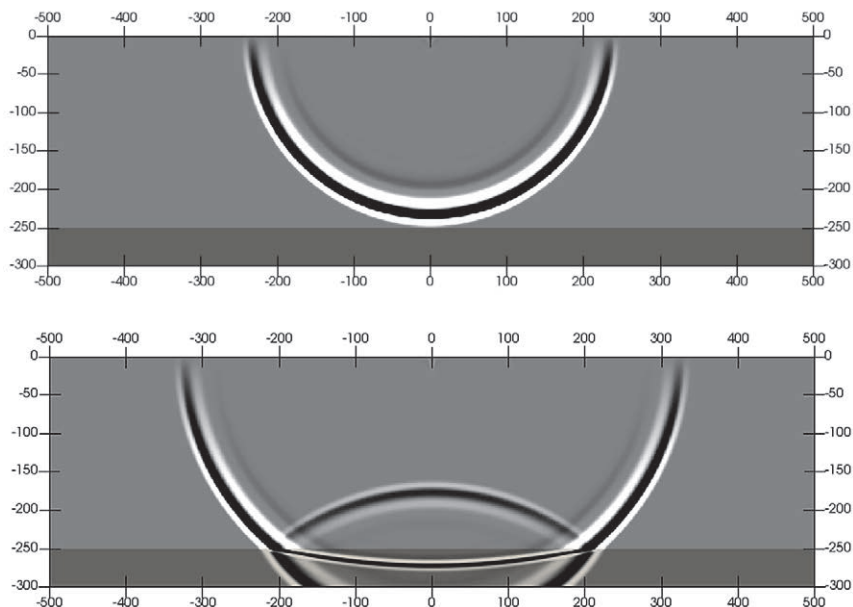


Рис. 1. Распределение давления в расчётной области через 160 мс (вверху) и 220 мс (внизу) после начала расчёта.

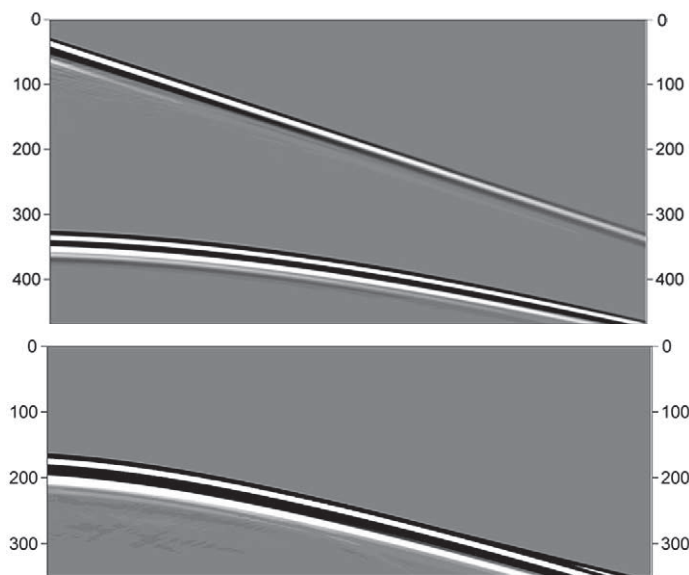


Рис. 2. Значения давления, зарегистрированные на горизонтальном удалении 50–500 м от источника. Приповерхностная коса на глубине 3 м (вверху) и донная коса на глубине 250 м (внизу). Время регистрации указано в мс.

рования на двух глубинах: 3 и 250 м. Расчёт проводился на прямоугольной расчётной сетке с размером ячейки 1 м, шаг по времени был выбран из условия Куранта равным 0,4 мс. При решении отдельных уравнений переноса на инварианты Римана использовалась схема Русанова с монотонизатором $\min\text{imax}$ третьего порядка точности.

На рис. 1 представлено распределение давления в толще воды и в насыщающем поры флюиде в последовательные моменты времени. Видно, что изначально от источника распространяется сферическая волна давления. После её взаимодействия с

границей донных осадков появляется отражённая волна, распространяющаяся обратно к дневной поверхности. При этом в насыщенной среде в полном соответствии с определяющими уравнениями иницируются две продольные волны с различными скоростями распространения.

На рис. 2 представлены сейсмограммы давления, зарегистрированные на приповерхностной и донной косах. На глубине 3 м регистрируется прямая акустическая волна от источника, за которой следует отклик от границы с донными осадками. На уровне дна регистрируется падающая волна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе в рамках единого сеточно-характеристического подхода проведено моделирование распространения сейсмических волн в акустической и пористой средах. В явном виде приведены контактные условия, достаточные для однозначного решения задачи контактного разрыва на контактной границе. Применительно к задаче морской сейсмической разведки показано, что использование явной модели пористой флюидонасыщенной среды позволяет рассчитать синтетические данные, регистрируемые как на донной, так и на плавающей в приповерхностном слое косе.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (выполнение фундаментальных научных исследований ГП 14) по теме № 0065–2019–0005 “Математическое моделирование динамических процессов в деформируемых и реагирующих средах с использованием многопроцессорных вычислительных систем” (№ АААА–А19–119011590092–6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Virieux J., Calandra H., Plessix R.E.* A Review of the Spectral, Pseudo-Spectral, Finite-Difference and Finite-Element Modelling Techniques for Geophysical Imaging // *Geophysical Prospecting*. 2011. V. 59 (5). P. 794–813.
2. *Golubev V.I., Gilyazutdinov R.I., Petrov I.B., Khokhlov N.I., Vasyukov A.V.* Simulation of Dynamic Processes in Three-Dimensional Layered Fractured Media with the Use of the Grid-Characteristic Numerical Method // *J. Appl. Mechanics and Technical Physics*. 2017. V. 58. № 3. P. 539–545.
3. *Favorskaya A., Petrov I., Golubev V., Khokhlov N.* Numerical Simulation of Earthquakes Impact on Facilities by Grid-Characteristic Method // *Proc. Comp. Sci*. 2017. V. 112. P. 1206–1215.
4. *Favorskaya A.V., Petrov I.B.* Wave Responses from Oil Reservoirs in the Arctic Shelf Zone // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 466. № 2. P. 214–217.
5. *Golubev V.I., Golubeva Yu.A.* Full-Wave Simulation of the Earthquake Initiation Process // *CEUR Workshop Proc*. 2018. V. 2267. P. 346–350.
6. *Beklemysheva K.A., Vasyukov A.V., Golubev V.I., Zhuravlev Y.I.* On the Estimation of Seismic Resistance of Modern Composite Oil Pipeline Elements // *DAN*. 2018. V. 97. № 2. P. 184–187.
7. *Golubev V., Khokhlov N., Grigorievych D., Favorskaya A.* Numerical Simulation of Destruction Processes by the Grid-Characteristic Method // *Proc. Comp. Sci*. 2018. V. 126. P. 1281–1288.
8. *Muratov M.V., Petrov I.B.* Application of Fractures Mathematical Models in Exploration Seismology Problems Modeling // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2019. V. 133. P. 120–131.
9. *Golubev V.I.* The Usage of Grid-Characteristic Method in Seismic Migration Problems // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2019. V. 133. P. 143–155.
10. *Dorovsky V., Perepechko Yu., Fedorov A.* The Stoneley Waves in the Biot–Johnson Theory and Continual Filtration Theory // *Russ. Geol. Geophys.* 2012. V. 53. P. 621–630.
11. *Deresiewicz H., Skalak R.* On Uniqueness in Dynamic Poroelasticity // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1963. V. 53. № 4. P. 783–788.
12. *Chiavassa G., Lombard B.* Wave Propagation across Acoustic / Biot’s Media: a Finite-Difference Method // *Commun. Comput. Phys*. 2012. V. 13. P. 985–1012.
13. *Rosenbaum J.H.* Synthetic Microseismograms – Logging in Porous Formations // *Geophysics*. 1974. V. 39. P. 14–32. DOI: 10.1190/1.1440407
14. *Winkler K.W., Liu H.L., Johnson D.L.* Permeability and Borehole Stoneley Waves: Comparison Between Experiment And Theory // *Geophysics*. 1989. V. 54. P. 66–75.
15. *Заславский Ю.М., Кержаков Б.В., Кулинич В.В.* Вертикальное сейсмическое профилирование на морском шельфе // *Акуст. журн*. 2008. Т. 54. № 3. С. 483–490.

TAKING INTO ACCOUNT THE FLUID SATURATION OF BOTTOM SEDIMENTS IN MARINE SEISMIC SURVEY PROBLEM

V. I. Golubev^{1,2}, A. V. Shevchenko¹, Corresponding Member of the RAS I. B. Petrov^{1,2}

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation*

² *Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

Received June 17, 2019

The problem of the numerical simulation of the seismic response from the marine bottom is considered. Acoustic equations are used for the description of the water dynamic behavior. Bottom sediments are described with the porous fluid-filled medium. The Dorovsky model is used. The algorithm for solving all hyperbolic equation systems with the grid-characteristic method was proposed. The distinctive feature of this approach is the ability to set explicitly necessary contact conditions between media with different rheology.

Keywords: mathematical modeling, grid-characteristic method, seismic survey process, porous media, Dorovsky model.