МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.139-141 УДК 550.8:622.276

Цифровое месторождение

С.И. Кабанихин[1,2,3], *М.А. Шишленин*[1,2,3*]

[1]*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2]*Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*
[3]*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

В работе представлены разработанные вычислительные технологии, которые участвуют в комплексе программ по созданию цифровой модели действующего месторождения. Разработаны линейные методы обработки площадных систем сейсмических наблюдений, а также алгоритмы определения электромагнитных параметров околоскважинного пространства для горизонтально слоистой среды.

Разработана вычислительная технология, позволяющая в реальном времени вести мониторинг дебита скважины, газового фактора и обводненности по дополнительным измерениям термодинамических параметров скважин. На основе этой технологии реализованы методы, позволяющие максимизировать добычу действующего месторождения с учетом диаметра трубопроводов, интенсивности добычи и т.д.

Разработаны алгоритмы определения коэффициента фильтрации пласта месторождения по данным давления, заданного в нагнетающих и добывающих скважинах, на основе которых оптимизировано бурение новых дополнительных нагнетающих и добывающих скважин.

Ключевые слова: обратные задачи, вычислительные методы, фильтрация, каротаж, сейсморазведка, высокопроизводительные вычисления

Для цитирования: Кабанихин С.И., Шишленин М.А. (2018). Цифровое месторождение. *Георесурсы*, 20(3), Ч.1, с. 139-141. DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.139-141

Обработка сейсмических данных площадных систем измерений

В настоящее время, благодаря площадным системам наблюдений, удалось создать принципиально новый метод решения трехмерных обратных задач, в котором используются: трехмерный аналог уравнения М.Г. Крейна (Кабанихин, 1989; Kabanikhin et al., 2004; Kabanikhin, Shishlenin, 2011), параллельные вычисления на высокопроизводительных кластерах, методы Монте-Карло (Kabanikhin et al., 2015b; Kabanikhin et al., 2015c), супербыстрые алгоритмы обращения блочно-теплицевых матриц больших размерностей (Kabanikhin et al., 2015a).

Основной проблемой исследования трехмерных упругих сред является большой размер области; даже для участка 2 км×2 км×2 км решение прямой задачи сейсморазведки с разрешением 1 метр может занимать на 80 ядрах одного узла вычислительного кластера до 150 часов. А если учесть, что большинство современных методов решения обратных задач основаны на итерационных процедурах, то даже количество операций, требуемых для проведения нескольких итераций, может привести к неконтролируемым ошибкам. Это обстоятельство осложняется сильной некорректностью обратных задач, которое заключается в неединственности решения, а также в неустойчивости, которая сильно возрастает с глубиной.

Ранее был предложен алгоритм численного решения обратной задачи для систем уравнений гиперболического типа (уравнения акустики, Максвелла, Ламе) в трехмерном пространстве с дополнительной информацией на части полуплоскости (площадная система наблюдений) (Kabanikhin, Shishlenin, 2011). Основная идея заключается в применении проекционного метода с последующим сведением нелинейной обратной задачи к многопараметрическому семейству линейных интегральных уравнений (многомерный аналог уравнения М.Г. Крейна) (Кабанихин, 1989).

Рассмотрим обратную задачу определения скорости среды:

$$c^{-2}(x,y)u_{tt}^{(k)} = \Delta u^{(k)},\ x\in R,\ y\in R,\ t>0,\ k=0,\pm1,\pm2,\ldots$$
$$u^{(k)}(x,y,0)=0;\ \ u_t^{(k)}(x,y,0)=e^{iky}\cdot\delta(x).$$

по дополнительной информации

$$u^{(k)}(0,y,t)=f^{(k)}(y,t),\ u_x^{(k)}(0,y,t)=0,\ k=0,\pm1,\pm2,\ldots$$

Пусть $\tau(x,y)$ является решением уравнения эйколнала:

$$\tau_x^2+\tau_y^2=\frac{1}{c^2(x,y)},\ \ x>0, y\in R;$$
$$\tau(0,y)=0,\ \ \tau_x(0,y)=\frac{1}{c(0,y)},\ \ y\in R.$$

Введем новые переменные и функции:

$$z=\tau(x,y),\quad y=y$$
$$v^{(k)}(z,y,t)=u^{(k)}(x,y,t),\ \ b(z,y)=c(x,y).$$

Тогда нелинейную коэффициентную обратную задачу можно свести к семейству интегральных уравнений (многомерный аналог уравнения М.Г. Крейна):

$$\sum_m S^m(z,y)f_m^{k\prime}(t-z)+w^{(k)}(z,y,t)+$$
$$+\sum_m\int_{-z}^{z} f_m^{k\prime}(t-s)w^{(m)}(z,y,s)\,ds=0,$$
$$|t|<z,\quad k=0,\pm1,\pm2,\ldots$$

Здесь функция $w^{(m)}(z,y,t)$ имеет следующий вид:

* *Ответственный автор: Максим Александрович Шишлепин*
E-mail: mshishlenin@ngs.ru

$$w^{(m)}(z,y,t)=S^{(m)}(z,y)\delta(z-t)+Q^{(m)}(z,y)\theta(z-t)+$$
$$+\tilde{w}^{(m)}(z,y,t).$$

Уравнение М.Г. Крейна необходимо дополнить следующими задачами:

$$\begin{cases}2S_z^{(m)}+qS_y^{(m)}+pS^{(m)}=0, \quad z>0,\ y\in R,\\ S^{(m)}(0,y)=\dfrac{1}{2}e^{imy}\end{cases}$$

$$\begin{cases}2Q_{zz}^{(m)}=S_{zz}^{(m)}-\left[qQ_y^{(m)}+b^2S_{yy}^{(m)}+pQ^{(m)}\right], \ z>0,\ y\in R,\\ Q^{(m)}(0,y)=0\end{cases}$$

Здесь

$$q(z,y)=2b^2(z,y)\tau_y,\ p(z,y)=b^2(z,y)\left(\tau_{xx}+\tau_{zz}\right),$$
$$b(z,y)=c(x,y).$$

Определение параметров действующих скважин по стандартным датчикам давления и температуры

Извлечение нефти из скважин производится либо за счет естественного фонтанирования под действием пластового давления, либо путем использования одного из механизированных способов подъема жидкости. Обычно в начальной стадии разработки действует фонтанная добыча, а по мере ослабления фонтанирования скважину переводят на механизированный способ. Одной из важных задач диагностики состояния скважины является оперативное определение изменения дебита скважины, газового фактора и обводненности (Кабанихин и др., 2011). Ранее был разработан алгоритм оценивания указанных параметров, основанный на численном моделировании прямой задачи, состоящей в определении давления и температуры по стволу вертикальной фонтанной скважины по заданной температуре и давлению в забое скважины. Методы расчета прямой задачи для действующей скважины основаны на решении уравнений тепломассопереноса. Для расчета теплофизических свойств водонефтегазовой смеси используются данные о стандартных характеристиках и компонентном составе нефтегазовой смеси, эмпирических корреляций, диаметре и наклоне скважины, структурах течения (пузырьковая, пробковая, кольцевая) и др. Также предложен алгоритм решения прямой задачи, позволяющий получить распределение давления и температуры по стволу скважины с учетом структуры течения и глубины разгазирования. Дифференциальные уравнения тепломассопереноса решаются численно от забоя до устья скважины. В обратной задаче требуется определить дебит, газовый фактор и обводненность по измеренным в устье скважины давлению и температуре. В работах (Рязанцев и др., 2013; Кабанихин и др., 2011) разработаны алгоритмы решения прямой и обратной задач в случае, когда измерения давления и температуры производятся на определенной глубине. В данной работе показано, что для фонтанной скважины данный алгоритм можно применить в случае, когда давление и температура измеряются на поверхности (в устье) скважины. Важность решения прямой и обратной задач в скважине определяется тем, что в настоящее время только в России эксплуатируется около ста тысяч скважин. Установка специального оборудования, позволяющего осуществлять постоянный мониторинг работы скважин, процесс сложный и дорогостоящий. Реализован мониторинг и вычислительная технология, использующие входящие в стандартный набор телеметрии погружного насоса датчики и дополнительные измерения давления и температуры на поверхности, в реальном времени.

На основе разработанных алгоритмов реализована вычислительная технология, позволяющая максимизировать добычу действующего месторождения с учетом диаметра трубопроводов, интенсивности добычи и т.д.

Определение фильтрации пласта действующего месторождения по датчикам давления, установленных в скважинах

Одной из важных задач действующего месторождения является определение пластовых параметров по измерению давления внутри скважин месторождения. На основе математической модели уравнения диффузии решается обратная задача по определению коэффициента фильтрации по данным давления заданного в нагнетающих и добывающих скважинах. Задача сводится к решению многомерной коэффициентной обратной задачи для уравнения диффузии по данным, измеренным в дискретном наборе точек (Кабанихин, Шишленин, 2018).

Также решена задача оптимизации размещения дополнительных нагнетающих и добывающих скважин с учетом полученных данных при решении обратной задачи.

Определение электромагнитных параметров околоскважинного пространства

Разработана вычислительная технология, позволяющая определять электромагнитные параметры околоскважинного пространства в случае горизонтально слоистой среды в случае одного источника и двух приемников отраженного сигнала. Полученные формулы на границе раздела сред (на основе законов сохранения) гарантируют физичность полученных результатов и адекватность решения коэффицентной обратной задачи (Романов др., 2010; Эпов и др., 2011в; Эпов и др., 2011а; Эпов и др., 2011б).

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 18-41-540017, 18-01-00865, 17-51-540004, 16-29-15120, 16-01-00755).

Литература

Кабанихин С.И. (1989). О линейной регуляризации многомерных обратных задач для гиперболических уравнений. *Доклады РАН*, 309 (4), с. 791-795.

Кабанихин С.И., Черемисин А.Н., Шишленин М.А. (2011). Обратная задача определения обводненности и дебита в вертикальной фонтанной скважине. *Сиб. журн. индустр. матем.,* 14(3), с. 31-36.

Кабанихин С.И., Шишленин М.А. (2018). Восстановление коэффициента диффузии, зависящего от времени, по нелокальным данным. *Сиб. журн. вычисл. матем.*, 21(1), с. 55-63. https://doi.org/10.15372/SJNM20180104

Романов В.Г., Кабанихин С.И., Шишленин М.А. (2010). Исследование математической модели электромагнитного зонда в осесимметричной скважине. *Сиб. Электр. Матем. Изв.*, 7, с. 307-321.

Рязанцев А.Э., Кабанихин С.И., Шишленин М.А. (2013). Математическое обоснование использования систем телеметрии погружных насосов для непрерывного мониторинга работы добывающих скважин. *Вестник ЦКР Роснедра*, 5, с. 32-36.

Эпов М.И., Ельцов И.Н., Кабанихин С.И., Шишленин М.А. (2011а). Об определении граничных условий в околоскважинном пространстве на недоступной части границы. *Сиб. Электр. Матем. Изв.*, 8, с. 400-410.

Эпов М.И., Ельцов И.Н., Кабанихин С.И., Шишленин М.А. (2011б). Совмещенная постановка двух обратных задач геоэлектрики. *Сиб. Электр. Матем. Изв.*, 8, с. 394-399.

Эпов М.И., Кабанихин С.И., Миронов В.Л., Музалевский К.В., Шишленин М.А. (2011в). Сравнительный анализ двух методов расчета электромагнитных полей в прискважинном пространстве нефтегазовых коллекторов. *Сиб. журн. индустр. матем.*, 14(2), с. 132-138.

Kabanikhin S.I., Novikov N.S., Oseledets I.V., Shishlenin M.A. (2015a). Fast Toeplitz linear system inversion for solving two-dimensional acoustic inverse problem. *J. of Inverse and Ill-Posed Problems*, 23(6), pp. 687-700.

Kabanikhin S.I., Sabelfeld K.K., Novikov N.S., Shishlenin M.A. (2015b). Numerical solution of an inverse problem of coefficient recovering for a wave equation by a stochastic projection methods. *Monte Carlo Methods and Applications*, 21(3), pp. 189-203.

Kabanikhin S.I., Sabelfeld K.K., Novikov N.S., Shishlenin M.A. (2015c). Numerical solution of the multidimensional Gelfand-Levitan equation. *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*, 23(5), pp. 439-450.

Kabanikhin S.I., Satybaev A.D., Shishlenin M.A. (2004). Direct Methods of Solving Multidimensional Inverse Hyperbolic Problems. VSP, The Netherlands, 179 p.

Kabanikhin S.I., Shishlenin M.A. (2011). Numerical algorithm for two-dimensional inverse acoustic problem based on Gelfand-Levitan-Krein equation. *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*, 18(9), pp. 979-996.

Сведения об авторах

Сергей Игоревич Кабанихин – директор, доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 6

Максим Александрович Шишленин – заместитель директора по научной работе, доктор физ.-мат. наук

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 6

E-mail: mshishlenin@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 10.08.2018;
Принята к публикации 16.08.2018; Опубликована 30.08.2018

IN ENGLISH

Digital field

S.I. Kabanikhin[1,2,3], M.A. Shishlenin[1,2,3]*

[1]Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[2]Sobolev Institute of Mathematics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
[3]Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
[*]Corresponding author: Maksim A. Shishlepin, e-mail: mshishlenin@ngs.ru

Abstract. The paper presents the developed computational technologies that participate in a complex of programs for creating a digital model of an operating field. Linear methods of processing the areal systems of seismic observations, as well as algorithms for determining the electromagnetic parameters of the near wellbore space for a horizontally layered medium, are developed. A computational technology was developed that allows real-time monitoring of well production rate, gas factor and water cut for additional thermodynamic parameters of wells. On the basis of this technology, methods are implemented to maximize the production of the existing field, taking into account the diameter of the pipelines, the intensity of production, etc. The algorithms for determining the reservoir field filtration coefficient from the pressure data specified in the injection and production wells have been developed, on the basis of which the drilling of new additional injection and production wells has been optimized.

Keywords: inverse problems, computational methods, filtration, logging, seismic survey, high-performance computing

Recommended citation: Kabanikhin S.I., Shishlenin M.A. (2018). Digital field. *Georesursy = Georesources*, 20(3), Part 1, pp. 139-141. DOI: https://doi.org/10.18599/grs.2018.3.139-141

References

Epov M.I., El'tsov I.N., Kabanikhin S.I., Shishlenin M.A. (2011a). On determination of boundary conditions in the wellbore space on the inaccessible part of the boundary. *Sib. Elekt. Mat. Izv.*, 8, pp. 400-410. (In Russ.)

Epov M.I., El'tsov I.N., Kabanikhin S.I., Shishlenin M.A. (2011b). Combined statement of two inverse problems of geoelectrics. *Sib. Elekt. Mat. Izv.*, 8, pp. 394-399. (In Russ.)

Epov M.I., Kabanikhin S.I., Mironov V.L., Muzalevskii K.V., Shishlenin M.A. (2011c). Comparative analysis of two methods for calculating electromagnetic fields in the near-well space of oil and gas reservoirs. *Sib. Zh. Ind. Mat.*, 14(2), pp.132-138. (In Russ.)

Kabanikhin S.I. (1989). On linear regularization of multidimensional inverse problems for hyperbolic equations. *Doklady RAN*, 309(4), pp. 791-795. (In Russ.)

Kabanikhin S.I., Cheremisin A.N., Shishlenin M.A. (2011). The inverse problem of determining stream watering and discharge in a vertical flowing well. *Sib. Zh. Ind. Mat.*, 14(3), pp. 31-36 (In Russ.)

Kabanikhin S.I., Novikov N.S., Oseledets I.V., Shishlenin M.A. (2015a). Fast Toeplitz linear system inversion for solving two-dimensional acoustic inverse problem. *J. of Inverse and Ill-Posed Problems*, 23(6), pp. 687-700.

Kabanikhin S.I., Sabelfeld K.K., Novikov N.S., Shishlenin M.A. (2015b). Numerical solution of an inverse problem of coefficient recovering for a wave equation by a stochastic projection methods. *Monte Carlo Methods and Applications*, 21(3), pp. 189-203.

Kabanikhin S.I., Sabelfeld K.K., Novikov N.S., Shishlenin M.A. (2015c). Numerical solution of the multidimensional Gelfand-Levitan equation. *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*, 23(5), pp. 439-450.

Kabanikhin S.I., Satybaev A.D., Shishlenin M.A. (2004). Direct Methods of Solving Multidimensional Inverse Hyperbolic Problems. VSP, The Netherlands, 179 p.

Kabanikhin S.I., Shishlenin M.A. (2011). Numerical algorithm for two-dimensional inverse acoustic problem based on Gelfand-Levitan-Krein equation. *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*, 18(9), pp. 979-996.

Kabanikhin S.I., Shishlenin M.A. (2018). Recovery of the time-dependent diffusion coefficient by known non-local data. *Sib. Zh. Vychisl. Mat.*, 21(1) (2018), pp. 55-63; *Num. Anal. Appl.*, 11(1), pp. 38-44. https://doi.org/10.15372/SJNM20180104

Romanov V.G., Kabanikhin S.I., Shishlenin M.A. (2010). Investigation of the mathematical model of an electromagnetic probe in an axisymmetric borehole. *Sib. Elekt. Mat. Izv.*, 7, pp. 307-321. (In Russ.)

Ryazantsev A.E., Kabanikhin S.I., Shishlenin M.A. (2013). Mathematical feasibility of the use of submersible pump telemetry systems for continuous monitoring of production wells. *Vestnik TsKR Rosnedra*, 5, pp. 32-36. (In Russ.)

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 18-41-540017, 18-01-00865, 17-51-540004, 16-29-15120, 16-01-00755).

About the Authors

Sergey I. Kabanikhin – DSc (Physics and Mathematics), Director, Corresponding Member of RAS, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS

Ak. Lavrentiev ave., 6, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Maxim A. Shishlenin – DSc (Physics and Mathematics), Deputy Director on Scientific Work, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS

Ak. Lavrentiev ave., 6, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Manuscript received 10 August 2018;
Accepted 16 August 2018; Published 30 August 2018