УДК 550.8:519.86(075.8)

ИНТЕРВАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПЬЕЗОПРОВОДНОСТИ ПО ДАННЫМ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОСЛУШИВАНИЯ СКВАЖИН

© 2017 А.И.Кобрунов, В.Е.Кунцев

Ухтинский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 31.08.2017

Рассматривается задача построения интервальных оценок для результатов определения пространственного распределения эффективного фильтрационного сопротивления проницаемого пласта методом гидродинамической томографии. Решение основано на использовании интервальных оценок для времен движения особой точки кривой восстановления давления между всеми, участвующими в расчетах парами скважин и информационного графа для оператора расчета коэффициентов пьезопроводности. Построен алгоритм получения интервальных оценок и приведены примеры расчетов по тестовому месторождению.

Ключевые слова: гидродинамическая томография, коэффициент пьезопроводности, фильтрационное сопротивление, интервальные времена, интервалы доверия, информационный граф, алгоритм расчета.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В процессе эксплуатации нефтяных и газовых месторождений происходит изменение фильтрационных характеристик коллектора [1, 2], связанных с закупоркой, асфальтизацией порового пространства и другими факторами, приводящими к снижению фазовой гидродинамической проницаемостью. Это, в свою очередь, приводит к снижению извлекаемости запасов углеводородного сырья и возможному выходу из эксплуатации значительных участков месторождения. Для купирования возникающих зон пониженной проводимости или даже зон застоя (стояков) существуют технологические решения, которые, тем не менее, требуют пространственной локализации этих зон. Необходимо знать где они находятся и каковы их геометрические характеристики. Существует несколько подходов к решению проблемы локализации зон пониженной фильтрационной проводимости среди которых отслеживание траектории меченой жидкости (что крайне затруднено) и использование томографических подходов к построению изображений пространственного распределения коэффициента пьезопроводности [3], что составляет предмет настоящей работы. Этот подход, основан на использовании традиционных гидродинамических технологий [4, 5] исследования проницаемости пласта [6], но

отличается специализированной - веерной системой наблюдений за депрессией на пласт и ее откликом в соседних скважинах. Данное направление называется гидродинамической томографией получило развитие в работах [7]. Исходные данные, используемые для реализации алгоритма гидродинамической томографии могут быть получены, во-первых, непосредственным наблюдением за процессом депрессии на пласт и откликом на нее по всем доступным для наблюдения соседним скважин. В этом случае возникает аналог веерной томографической системы [8]. Те же данные могут быть синтезированы из наблюдений за историей разработки месторождений и создании ее модели как имитационной упругой модели [9, 10]. Может быть использован симбиоз первого и второго, что составляет содержание этапа подготовки томографических данных.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Специфика данных приводит к существованию значимых погрешностей в их значениях. Кроме того, реализация алгоритма гидродинамической томографии основана на обращении интегрального уравнения для поля времен (времена прихода возмущений – откликов по системе скважин от депрессии в скважинах по которым идет закачка) что является некорректной задачей. В итоге наличие погрешностей в данных приводит к значимым отклонениям в вариантах решения обратной задачи. Практический интерес в этих условиях будут иметь только те распределения коэффициента пьезопроводности, для которых имеется оценка их погрешностей. Однако задача оценки погрешностей в

Кобрунов Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры геофизических методов, геоинформационных технологий и систем. E-mail: aikobrunov@gmail.com

Кунцев Виталий Евгеньевич, аспирант кафедры информатики, компьютерных технологий и инженерной графики. E-mail: Vitaly.91@yandex.ru

решении некорректных задач является логически недоопределенной и требует развития новых, специализированных подходов. Логическая недоопределенность состоит в том, что в любом диапазоне неопределенности данных можно выделить элемент, на котором значение обратного оператора неограниченно. Поэтому строго говорить о погрешности в решении, наследуемой погрешностями в данных невозможно без изменения принципов рассмотрения операторов.

ОСНОВНЫЕ АЛГОРИТМЫ

Пространственное распределение коэффициента пьезопроводности $\kappa(\xi)$ определяет время движения экстремальной точки (точки перегиба) восстановления давлений, между выделенными парами скважин. Движение происходит по траектории $L(r_n, r_{end})$, соединяющей скважины, расположенные в точках (r_n, r_{end}) . Эта траектория такова, что интервальное время движения экстремальной точки между (r_n) и (r_{end})

$$\tau(r_{n,}r_{end}) = \int_{L(r_{n},r_{end})} \frac{l(\xi)d\xi}{3\kappa(\xi)}$$

минимально. Этим требованием определяется траектория движения экстремальной точки $L(r_n, r_{end})$. $l(\xi)$ – длина пройденного пути от начальной точки r_n до промежуточной ξ по траектории $L(r_n, r_{end})$. Задача гидродинамической томографии состоит в нахождении (приближенном) распределения коэффициента пьезопроводности $\kappa(\xi)$, как функции пространственной координаты ξ по результатам измерения всех доступных для измерения интервальных времен $\mathbf{\tau} = \{\tau_i\}; \tau_i = \tau(r_n^i, r_{end}^i)$. Эта задача решается традиционным методом последовательных приближений на основе линеаризации (1) в окрестности нулевого приближения.

Исходя из заданного нулевого приближения $\kappa^0(\xi)$ к искомому распределению коэффициента пьезопроводности линеаризуем уравнение (1) в окрестности нулевого приближения:

$$\Delta^{0}\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}^{0} = \left\{\Delta^{0}\boldsymbol{\tau}^{i}\right\} \approx \left\{-\int_{L(r_{n}^{i}, r_{end}^{i})} \frac{l(\boldsymbol{\xi})\Delta\kappa(\boldsymbol{\xi})d\boldsymbol{\xi}}{3\left[\kappa^{0}(\boldsymbol{\xi})\right]^{2}}\right\}$$
$$\kappa(\boldsymbol{\xi}) = \kappa^{0}(\boldsymbol{\xi}) + \Delta\kappa(\boldsymbol{\xi})$$

Это система линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов $\Delta \kappa(\xi)$, может быть представлено в матричной форме. Матричная запись (2) имеет вид:

$$A(\mathbf{K}^0)\Delta\mathbf{K} = \Delta^0 \boldsymbol{\tau}$$

Метод последовательных приближений состоит в нахождении $\Delta \mathbf{K}$ из (3), проверки качества результата $\mathbf{K}^1 = \mathbf{K}^0 + \Delta \mathbf{K}$ и повторения при необходимости вычислений с новым нулевым приближением равным \mathbf{K}^1 . Процесс продолжается до получения удовлетворительного результата. Этот алгоритм подробно описан в работе [11]. Оператор, реализующий описанную схему в его матричном представлении будем записывать в форме:

$$A^{-1}(\mathbf{K})\mathbf{\tau} = \mathbf{K} \; .$$

Отображение, следующе из (1) и позволяющее рассчитать поле времен $\boldsymbol{\tau} = \{\boldsymbol{\tau}_i\}; \boldsymbol{\tau}_i = \boldsymbol{\tau}\left(r_n^i, r_{end}^i\right)$ прихода экстремальных значений восстановления давления по системе пар скважин в зависимости от распределения коэффициента пьезопроводности обозначаем:

$$A(\mathbf{K}) = \mathbf{\tau} \ . \tag{5}$$

Оператор $A^{-1}(\mathbf{K})\mathbf{\tau} = \mathbf{K}$ является приближенным обратным [12] к «прямому» оператору (5) и устанавливает способ обращения (5) с целью расчета матрицы коэффициентов пьезопроводности **К** по наблюдаемым интервальным временам $\mathbf{\tau} = \{\tau_i\}; \tau_i = \tau(r_n^i, r_{end}^i).$

ГРАФОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПОТОКА ИНФОРМАЦИИ

Оператор (5) определяет взаимосвязь параметров из элементов матрицы К и параметров матрицы наблюдаемых τ . Граф, связывающий каждый элемент из К с каждым элементом из τ , оснащен весами для ребер, определяющими «коэффициент передачи» данных от элемента K_{ij} к τ_i . Это информационный граф оператора. Для линейных операторов $A = \{a_{ij}\}: A(\mathbf{K}) \approx \sum a_{ij} K_{ij} = \tau_{ij}$ родь

ров
$$A = \{a_{ijn}\}; A(\mathbf{K}) \approx \sum_{jn} a_{ijn} K_{ij} = \tau_i$$
, роль

весов играют элементы матрицы a_{ijn} . Пример изображения информационного графа приведен на рис. 1. По сути это тот же оператор A в его графическом представлении. Изображение информационного графа оператора распространяется и на случай нелинейных операторов, однако удобно рассматривать линейные приближения, для которых информационный граф более нагляден.

Пользуясь информационным графом для оператора (4) легко представить схемы передачи информации от компонент наблюдаемых интервальных времен к компонентам определяемой матрицы коэффициентов пьезопроводности. В качестве переносимых информационным графом параметров могут служить и характеристики наблюдаемых. Если для линейных операторов в качестве значений пере-



Рис. 1. Информационный граф оператора

носимых параметров будут выбраны величины интервалов доверия к наблюдаемым, то следует ожидать получения в качестве результата переноса интервалы доверия для итоговых определяемых параметров. Следует особо подчеркнуть, что оценки интервалов доверия корректны только в рамках модельных представлений, ле-

жащих в основе конструирования оператора A и не являются интервалами доверия в общем случае. Изменение модельных представлений

ведет к изменению конструкции оператора *А*, и как следствие, изменению вычисляемых интервалов доверия. В случае нелинейного оператора, к числу которых относится (4) отделение интервалов доверия от исходных данных неправомерно. Для определения интервалов доверия к определяемым параметрам – коэффициентам пьезопроводности в рамках сконструированной модели, следует определить параметры с переносимыми данными в верхней границе интервала доверия, повторить процедуру с данными соответствующими нижней границе интервала доверия и рассмотреть их разность.

Алгоритм нахождения интервалов доверия для коэффициента пьезопроводности заключается в следующем.

Для данных **т** определяется матрица доверительных интервалов $\Delta \mathbf{\tau} = \{\Delta \tau_i\}$ (не путать с промежуточными вычислениями $\Delta^0 \mathbf{\tau}$ в (2)) и конструируются два набора входных параметров:

$$\boldsymbol{\tau}^{\text{sup}} = \boldsymbol{\tau} + \Delta \boldsymbol{\tau} = \{ \boldsymbol{\tau}_i + \Delta \boldsymbol{\tau}_i \}; \boldsymbol{\tau}^{\text{inf}} = \boldsymbol{\tau} - \Delta \boldsymbol{\tau} = \{ \boldsymbol{\tau}_i - \Delta \boldsymbol{\tau}_i \}.$$
⁽⁶⁾

Далее по алгоритму, реализующему опе-

ратор (4), определяются матрицы параметров \mathbf{K}^{sup} и \mathbf{K}^{inf} соответствующие решениям уравнения (4) с данными $\boldsymbol{\tau}^{\text{sup}}$ и $\boldsymbol{\tau}^{\text{inf}}$ соответственно. Интервал доверия рассчитывается по правилу:

$$\Delta \mathbf{K} = \left| \mathbf{K}^{\text{sup}} - \mathbf{K}^{\text{inf}} \right|. \tag{7}$$

В роли интервала доверия Δ**К** могут выступать соответствующие размерности данных атрибуты нечеткой меры [13] для исходных данных. Итогом вычислений будут служит атрибуты нечеткой меры для определяемых коэффициентов пьезопроводности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим в качестве примера тестовое месторождение (рис. 2), содержащее 28 скважин. Все скважины последовательно были рассмотрены в качестве источника депрессии на пласт, по которой были смоделированы интервальные времена отклика в соседних скважинах. Всего в томографическом эксперименте участвуют 756 пар скважин, для охвата большей площади месторождения: $\tau = \{\tau_i, i=1.756\}$. В качестве нулевого приближения пространственного распределения коэффициента пьезопроводности выбрана однородная среда ($\kappa(\xi(x, y))=0,3$). Цветовая легенда соответствует обратной нормированной эффективной величине коэффициента пьезопроводности с условной размерностью. Значения, близкие к 1, соответствуют зонам аномального фильтрационного сопротивления (низкое значение коэффициента пьезопроводности), а значения, близкие к нулю, - соответствуют высокопроницаемым зонам.



Рис. 2. Расположение скважин и сетка на месторождении с заданным нулевым приближение среды К

На первом шаге вычислительного алгоритма гидродинамической томографии были определены траектории движения депрессии (экстремальной точки восстановления давления) между парами скважин L^0 и рассчитаны интервальные времена τ^0 для нулевого приближения среды K (рис. 3).

Итогом вычислений на первой итерации гидродинамической томографии является новое пространственное распределение коэффициента пьезопроводности K^1 (рис. 4), которое будет использоваться в качестве начального приближения среды на второй итерации.

Финальный результат гидродинамической томографии проницаемого пласта нефтяного месторождения представлен на рис. 5. Решение о прекращении процесса гидродинамической томографии принимается на основании заключения о том, что отклонение экспериментальных интервальных времен τ и времен τ^n , рассчитанных на итерации п, может считаться удовлетворительной.



Рис. 3. Траектории движения экстремальной точки восстановления давления между парами скважин на первой итерации алгоритма гидродинамической томографии



Рис. 4. Пространственное распределение коэффициента пьезопроводности после первой итерации алгоритма гидродинамической томографии *К*¹



Рис. 5. Результат гидродинамической томографии проницаемого пласта

После решения задачи гидродинамической томографии для времен τ , конструируем новые наборы интервальных времен, включающие доверительные $\Delta \tau$. Доверительный интервал времен τ был задан с уровнем 0,8 от интервального времени. Таким образом, разброс данных составлял **0,2** от значений интервального времени в каждой используемой для расчетов паре скважин. Верхняя и нижняя границы доверительного интервала с уровнем доверия 0,8 τ^{sup} и τ^{inf} определялись по формулам:

$$\boldsymbol{\tau}^{\text{sup}} = \boldsymbol{\tau} + (1 - 0, 8)\boldsymbol{\tau};$$

$$\boldsymbol{\tau}^{\text{inf}} = \boldsymbol{\tau} - (1 - 0, 8)\boldsymbol{\tau}.$$
 (8)

Для каждого из набора времен τ^{sup} и τ^{inf} была решена задача гидродинамической томографии и получены соответствующие пространственные распределения коэффициента пьезопроводности K^{sup} (рис. 6) и K^{inf} (рис. 7).



Рис. 6. Пространственное распределение коэффициента пьезопроводности K^{sup} для времен τ^{sup}



Рис. 7. Пространственное распределение коэффициента пьезопроводности K^{inf} для времен τ^{inf}

Интервал доверия ΔK (рис. 8) для распределения коэффициента пьезопроводности K между двумя решениями K^{sup} и K^{inf} рассчитывался по приведенному выше правилу (7). На краях сетки количество траекторий движения особой точки мало, в следствии чего в процессе расчетов эти участки мало изменялись относительно нулевого приближения, либо не изменялись вовсе. Именно с этим связаны пониженные значения интервала доверия. Это обстоятельство следует иметь в виду увязывая интервал доверия ΔK с плотностью сети траекторий (рис. 9) в соответствующих зонах модели. Количество траекторий в ячейках сети нормировано относительно максимального значения.

выводы

Построение пространственного распределения эффективного фильтрационного сопротивления основано на построении пространственного распределения коэффициента пьезопроводности методом гидродинамической томографии.



Рис. 8. Интервал доверия *АК* коэффициента пьезопроводности *К*



Рис. 9. Частота траекторий особой точки в ячейках сетки

Для оценки интервала доверия к результатам расчетов в методе гидродинамической томографии исходными данными служат интервальные оценки уровня доверия к интервальным временам движения возмущений между парами скважин, служащие входными данными в методе гидродинамической томографии.

На основании интервальных оценок уровня доверия формируются пакеты данных нижней и верхней границ интервалов входных данных. Пользуясь информационным графом оператора гидродинамической томографии и принципами динамики нечетких мер для операторных уравнений, определяются нижние и верхние границы распределений коэффициента пьезопроводности, которые определяют искомые интервальные оценки. В вычислительном отношении это соответствует повторению расчетов для реализации схемы гидродинамической томографии с данными, соответствующими краевым интервалам используемых времен движения, возмущения между всеми парами скважин.

Приведенные вычислительные расчеты демонстрируют эффективность описанного алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Баренблатт Г.Н., Ентов В.М., Рыжик В.М.* Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
- 2. *Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И.* Физика нефтяного и газового пласта. М.: Недра, 1982. 312 с.
- Щелкачев В.Н. Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации. Часть 1. М.: Нефть и газ, 1995. 586 с.
- Чодри А. Гидродинамические исследования скважин [Пер. с англ. под ред. С.Г. Вольпина]. М.: ООО «Премиум инжиниринг», 2011. 687 с.
- 5. Вольпин С.Г., Лавров В.В. Состояние гидродинамических исследований скважин в нефтедобывающей отрасли России // Нефтяное хозяйство. 2003. № 6. С. 66–68.
- 6. *Чернов Б.С., Базлов М.Н., Жуков А.И.* Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. М.: Гостоптехиздат, 1960. 320 с.
- Кобрунов А.И. Математическая модель томографии на давлениях при контроле за разработкой нефтяных месторождений // Известия Коми на-

учного центра Уро РАН. 2012. № 4–12. С. 82–86.

- Терещенко С.А. Методы вычислительной томографии. М: ФизМатЛит, 2004. 319 с.
- Краснов В.А., Иванов В.А., Хасанов М.М. Помехоустойчивый метод оценки связности пласта по данным эксплуатации месторождений // Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче (Москва, 16– 18 октября 2012 года). SPE. 162053.
- Кобрунов А.И., Кунцев В.Е., Мотрюк Е.Н. Технология оценки связности скважин на основе модели эксплуатации месторождения // Фундаментальные исследования. 2015. № 6–3. С. 452–456.
- Кобрунов А.И., Кунцев В.Е. Мотрюк Е.Н. Вычислительная схема гидродинамической томографии // Фундаментальные исследования. 2016. № 7-2. С. 230-235.
- 12. *Тихонов, А. Н., Арсенин, В. Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
- 13. *Кобрунов А.И*. Нечетко-атрибутный анализ решений операторных уравнений // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 1(2). С. 410–413.

INTERVAL EVALUATIONS FOR PIEZOCONDUCTIVITY COEFFICIENT BY DATA OF TOMOGRAPHIC PROCESSING OF THE DATA OF HYDRODYNAMIC LISTENING WELLS

© 2017 A.I. Kobrunov, V.E. Kuntsev

Ukhta State Technical University

The article is dedicated to the problem of construction interval evaluations for results of determining the spatial distribution of effective filtration resistance of permeable field by the method of hydrodynamic tomography. The solution is based on use of interval evaluations for times of the movement of the singular point of pressure build-up curve between all wells are involved in calculations and information graph for the operator of calculating the piezoconductivity coefficients. The algorithm is constructed to obtain interval evaluations and results are given of calculations for the test field.

Keywords: Hydrodynamic tomography, piezoconductivity coefficient, filtration resistance, interval times, confidence intervals, information graph, calculation algorithm.

Vitaly Kuntsev, Postgraduate Student at the Informatics, Computer Technologies and Engineering Graphics Department. E-mail: Vitaly.91@yandex.ru

Alexander Kobrunov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor at the Geophysical Methods, Geoinformation Technologies and System Department. E-mail: aikobrunov@gmail.com