

Р. В. Распопов, И. Г. Соловьев

(Тюменский государственный нефтегазовый университет)

Ключевые слова: *нефтяной коллектор, идентификация, устойчивое оценивание, редукция модели, регуляризация*Key word: *oil reservoir, identification, robust estimation, model reduction, regularization*

Эффективность избирательных схем разработки и обустройства месторождений [1] со сложной анизотропной структурой строения коллекторов во многом зависит от уровня информационной обеспеченности процессов эксплуатации скважин [2] с одной стороны, а с другой надежной работой алгоритмов сопровождения ПДГТМ (постоянно действующих геолого-технологических моделей) [3]. Масштабное внедрение систем наземной и глубинной телеметрии [4], [5] создает основу для качественного развития технологий контроля и сопровождения фильтрационно-емкостных параметров коллекторов в режиме реального времени.

В рамках избирательных схем разработки особое значение начинает приобретать задача сопровождения гидродинамики локальных участков. Методы оценки параметров коллекторов на основе технологий группового гидропрослушивания скважин [6] ограничены в применении условиями стационарности краевых состояний и специальными режимами возмущений.

Рассмотренный ниже алгоритм оценки фильтрационных параметров участка залежи не накладывает жестких ограничений на стационарность и режимы возмущений скважин, что позволяет реализовывать стратегию сопровождения гидродинамической модели участка в режиме реального времени.

Известно, что задача оценки параметров распределенных сред по контролю процессов в конечном наборе точек является плохо обусловленной [7] и требует применения адекватных методов регуляризации решений [8].

Первый этап регуляризации – переход к осредненной динамике давлений конечных элементов. Предельный уровень огрубления закладывается схемой дренирования продуктивного горизонта сеткой скважин. Приведена геометрическая схема пространственного представления участка коллектора с трехрядной схемой заводнения (рис. 1).

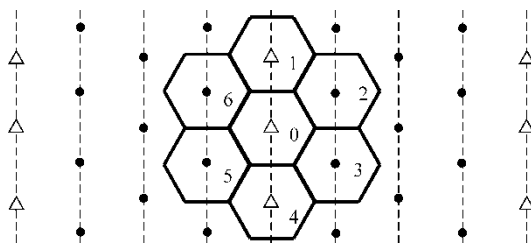


Рис. 1. Трехрядная сетка скважин с выделенным локальным участком

Соответствующая конечномерная модель (см. рис. 1) с принятой нумерацией скважин, имеет вид

$$\tau_0 \dot{p}_0(t) = w_1(p_1(t) - p_0(t)) + \dots + w_6(p_6(t) - p_0(t)) - q_0(t) + \delta p_0, \quad (1)$$

где  $p_i(t)$  – среднезональные давления выделенных сегментов, приведенные к единой горизонтали,  $q_0(t)$  – объемный расход жидкости в скважине ( $q(t) > 0$  – добыча,  $q(t) < 0$  – нагнетание),  $w_i$  – гидропроводность перехода между центральной и  $i$ -й зоной окаймления,  $\tau_0 = \beta_n m V_0$  – гидроупругий объем вмещающих пустот центральной зоны ( $\beta_n$  – коэффициент гидроупругости,  $m$  – пористость,  $V_0$  – пространственный объем продуктивной части центральной зоны),  $\delta p_0$  – возможная ошибка приведения данных контроля,

$I_p \Leftarrow p_i(k), q_i(k), k = \overline{1, N}; i \in \{0, 1, \dots, 6\}$  – к единой горизонтали,  $p_i(k) = p_{iu}(k) - \gamma_i \Delta H_i$ ,  $p_{iu}(k)$  – регистрируемые в  $t_k$  моменты времени ( $t_{k+1} = t_k + \Delta t$ ) данные о среднезональном давлении,  $\gamma_i$  – удельный вес пластового флюида,  $\Delta H_i$  – расстояние от среднего уровня  $i$ -й зоны до проекционной горизонтали.

В предположении, что параметр  $\tau_0$  известен, а ошибка приведения  $\delta p_0$  равна нулю, перейдем от (1) к модели вида

$$q_0(t) - \tau_0 \dot{p}_0(t) = w_1(p_1(t) - p_0(t)) + \dots + w_6(p_6(t) - p_0(t)), \quad (2)$$

тогда алгоритм МНК-оценивания вектора неизвестных параметров:

$\mathbf{c}^T = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5 \ w_6] \in R^6$  объекта (2), представленного в регрессионной форме, для дискретных временных моментов измерений:

$$y(k) = \mathbf{c}^T \mathbf{v}(k) + \xi(k), \quad k \in K = \{1, \dots, N\} \quad (3)$$

сводится к решению системы линейных уравнений:

$$\tilde{F} \tilde{\mathbf{c}} = \tilde{\mathbf{b}}, \quad (4)$$

где  $\tilde{\mathbf{c}}$  – искомые оценки вектора  $\mathbf{c}$ ,  $\tilde{F} = \sum_{k=1}^N \mu(k) \mathbf{v}(k) \mathbf{v}(k)^T$ ,  $\tilde{\mathbf{b}} = \sum_{k=1}^N \mu(k) y(k) \mathbf{v}(k)$ ,  $\mu(k) \geq 0$ ,  $\sum_{k=1}^N \mu(k) = \mu_0$  – весовые (нормирующие) коэффициенты,  $\xi(k)$  – приведенная ошибка измерений с нулевым средним, вектор регрессоров имеет вид

$\mathbf{v}(k)^T = [p_1(k) - p_0(k) \ ; \ \dots \ ; \ p_6(k) - p_0(k)]$ . Результаты решения задачи идентификации в исходном виде (1), (3), (4) оказываются крайне неустойчивыми, особенно в условиях малой информативности выборки из-за спорадических возмущений.

Одним из приемов повышения устойчивости результатов оценивания является редуцирование модели из-за использования априорной информации. Для этого ставится задача выявления симметрии фильтрационно-емкостных свойств коллектора с равномерно-непрерывной анизотропной структурой.

Для введенной ранее геометрической схемы участка (см. рис. 1) очевидное множество симметрий сведено в табл. 1, где пунктирами обозначены изолинии равновеликих фильтрационных свойств среды.

Таблица 1

**Возможные симметрии равномерно-непрерывных свойств идентифицируемого участка**

$j$	Изолинии равных свойств	Из условий симметрии	$j$	Изолинии равных свойств	Из условий симметрии
1		$w_1$ $w_2 = w_6$ $w_3 = w_5$ $w_4$	4		$w_2 = w_3$ $w_1 = w_4$ $w_5 = w_6$
2		$w_1 = w_2$ $w_3 = w_6$ $w_4 = w_5$	5		$w_3$ $w_2 = w_4$ $w_1 = w_5$ $w_6$
3		$w_2$ $w_1 = w_3$ $w_4 = w_6$ $w_5$	6		$w_1 = w_6$ $w_2 = w_5$ $w_3 = w_4$

Предположим, что пространственное распределение фильтрационных свойств среды  $w_i$  представляет наклонную плоскость, описываемую уравнением

$$z(x, y) = ax + by + d \quad \text{или} \quad z(x, y) = l \cdot \cos \alpha \cdot x + l \cdot \sin \alpha \cdot y + d, \quad (5)$$

где  $l$  – коэффициент угла наклона плоскости относительно горизонтали  $xy$ ,  $\alpha$  – угол поворота плоскости вокруг оси  $z$ ,  $d$  – средняя высота,  $x$  и  $y$  – координаты скважин в пределах локального участка.

Перепишем (5) в виде

$$z(x, y) = l(\beta \cdot x + \sigma \cdot y) + d, \quad (6)$$

где  $\beta$  и  $\sigma$  – коэффициенты угла поворота, значения которых известны и соответствуют номерам образов симметрий (см. табл. 1).

Учитывая (6), перейдем от исходной модели

(3) к модели вида

$$y(k) = l \left( (\beta_j x_1 + \sigma_j y_1) v_1(k) + \dots + (\beta_j x_6 + \sigma_j y_6) v_6(k) \right) + d \left( \sum_{i=1}^6 v_i(k) \right), \text{ в которой неизвестные параметры } l \text{ и } d$$

определяются по методу наименьших квадратов.

Пересчет полученных оценок параметров редуцированной модели в исходные параметры  $w_i$  осуществляется по формуле

$w_i = l(\beta_j \cdot x_i + \sigma_j \cdot y_i) + d$ . После вычисления для каждого образа симметрии параметров  $w_i$  определяются критерий отклонений по выходу:

$$J_y(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - \tilde{\mathbf{w}}(j)^T \mathbf{v}(k))^2 \text{ и критерий отклонений по параметрам:}$$

$$\rho(\tilde{\mathbf{w}}(j)) = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \left( \frac{\tilde{\mathbf{w}}(j) - \mathbf{w}_i}{\bar{\mathbf{w}}_i} \right)^2} \cdot 100\%, \text{ где } \bar{\mathbf{w}}_i = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \mathbf{w}_i. \text{ Численный эксперимент на модели с параметрами (табл. 2)}$$

(номер варианта симметрии  $j=2$  (см. табл. 1) проводился в предположении, что параметр  $\tau_0 = 600$  нам известен и ошибка приведения  $\delta p_0$  равна нулю. Режимы возбуждений скважин приведены на рис. 2, где цифрами отмечены номера зон. По условиям эксперимента возбуждается центральная нагнетательная скважина (с номером 0), остальные работают в квазистатическом режиме постоянного отбора или нагнетания (см. рис. 1).

Таблица 2

Параметры модели в эксперименте при номере варианта симметрии  $j = 2$

Параметр	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$	$w_6$
Значение	62,12	62,12	50	37,88	37,88	50

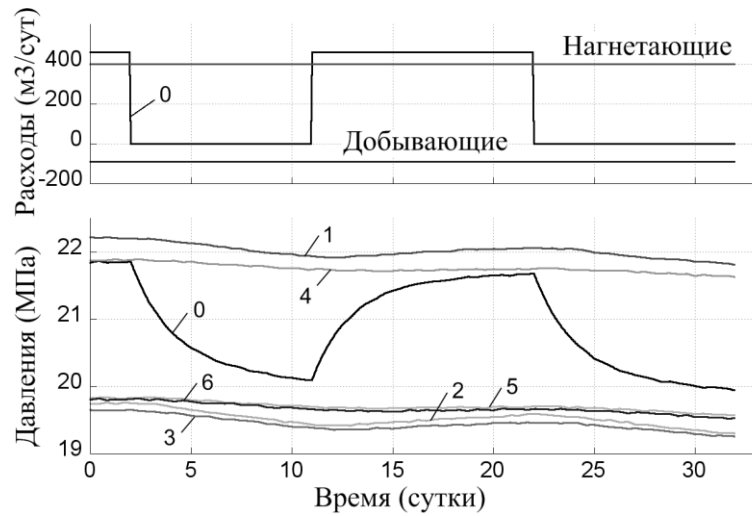


Рис. 2. Графики исходных данных

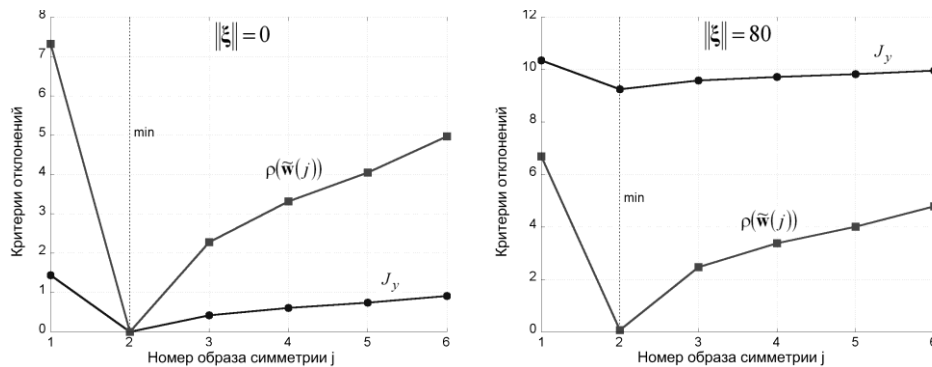
Задача оценивания решалась на двух выборках: незашумленной ( $\|\xi\| = 0$ ) и с шумом  $\|\xi\| = 80$  (в табл. 3 приведены результаты для случая  $\|\xi\| = 80$ ).

Таблица 3

Оценки параметров при зашумленной выборке данных

Параметры	Истинные значения	Номера симметрий					
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	$j = 6$
$l$	14	-4,775	12,238	3,498	2,311	2,136	2,613
$d$	50	49,686	49,964	49,862	49,828	49,803	49,773
$w_1$	62,124	44,911	60,562	51,611	49,828	48,736	47,51
$w_2$	62,124	47,299	60,562	53,36	51,829	50,871	49,773
$w_3$	50	52,074	49,964	51,611	51,829	51,939	52,036
$w_4$	37,876	54,462	39,365	48,113	49,828	50,871	52,036
$w_5$	37,876	52,074	39,365	46,364	47,826	48,736	49,773
$w_6$	50	47,299	49,964	48,113	47,826	47,668	47,51
$\rho(\tilde{w}(j))$	–	6,696	0,062	2,469	3,381	4,013	4,79
$J_y$	–	10,351	9,256	9,584	9,724	9,826	9,958

После решения, согласно рассмотренному алгоритму, для разных номеров симметрий  $j$  получены оценки  $\tilde{c}$  и  $\tilde{w}$ , а также значения критериев. На графиках критериев отклонений по выходу и по параметрам (рис. 3) отчетливо фиксируется минимум при  $j = 2$  (см. табл. 3).



**Рис. 3. Графики критериев точности  $J_y$  и  $\rho(\tilde{w}(j))$  для  $\|\xi\| = 0$  и  $\|\xi\| = 80$**

Результаты экспериментов, представленные в виде графиков (см. рис. 3) для примера локального участка коллектора с параметрами (см. табл. 2) и режимами возбуждения (см. рис. 2), свидетельствуют:

- критерий среднеквадратичных отклонений  $J_y$  фиксирует правильный образ симметрии  $j = 2$  в диапазоне действия помехи  $|\xi(k)| \leq 80$ ;
- оптимальный выбор образа симметрии по точности выхода при заданном уровне шума соответствует минимальной ошибке оценивания по параметрам  $\rho(\tilde{w}(j))$ , однако, при действии шума чувствительность критерия по выходу вблизи экстремума очень мала;
- априорное предположение о симметрии фильтрационных свойств позволяет сократить порядок модели и увеличить устойчивость оценок.

#### **Список литературы**

1. Лысенко В. Д., Грайфер В. И. Рациональная разработка нефтяных месторождений. - М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2005. - 607 с.
2. Жильцов В. В., Дударев А. В., Демидов В. П., Шитов Г. В., Чувинова В. В. Решения и развитие интеллектуальных технологий мониторинга и управления механизированным фондом скважин // Нефтяное хозяйство - 2006. - № 10. - С. 128-130.
3. Ведерникова Ю. А., Соловьев И. Г. Оценивание локальных гидродинамических характеристик нефтяных коллекторов // НТЖ «Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности». - 2005. - № 12. - С. 16-20.
4. Соловьев И. Г., Говорков Д. А. Факторы устойчивости МНК-оценок параметров притока вертикальной скважины // НТЖ «Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности». - 2009. - № 9. - С. 31-35.
5. Руководство по эксплуатации УЭЦН 468154.002 РЭ. Блок погружной БП для отслеживания текущих параметров в забое скважины. - Ижевск: ОАО «Ижевский радиозавод», 2001.
6. Соловьев И. Г. Гидродинамическая модель и идентификация локальных участков нефтяных коллекторов в режиме нормальной эксплуатации // Известия вузов. Нефть и газ. - 2005. - № 1. - С. 42.
7. Форсайт Дж., Молер К. Численное решение систем линейных алгебраических уравнений. - М.: Мир, 1969. - 168 с.
8. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. - М.: Наука, 1979. - 288 с.

#### **Сведения об авторах**

- Распопов Р. В.**, аспирант, Институт криосферы Земли СО РАН, тел.: (3452) 30-55-83, e-mail: romanraspopov@gmail.com
- Соловьев И. Г.**, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт проблем освоения Севера СО РАН, тел.: (3452)-68-99-08, e-mail: solovyev@ikz.ru
- Raspopov R. V.**, postgraduate student, Institute of Earth Cryosphere, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences, phone: (3452) 30-55-83, e-mail: romanraspopov@gmail.com
- Solovyev I. G.**, PhD, senior scientist, Institute of Northern Development, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences, phone: (3452)68-99-08, e-mail: solovyev@ikz.ru