**И.Г. Соловьев, Р.В. Распопов**

# УСТОЙЧИВОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЛЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ $\nu$-ОРТОГОНАЛИЗАЦИИ

*Исследуются вопросы повышения устойчивости оценок гидродинамических параметров локальных зон нефтеносных коллекторов на основе методов квазиортогонального редуцирования.*

***Нефтеносные коллекторы, гидропроводность, идентификация, ортогонализация, модель.***

Эффективность использования постоянно действующих геолого-технологических моделей (ПДГТМ) коллекторов в задачах анализа, прогноза и регулирования разработки месторождений [6, 8, 9] напрямую зависит от точности описания фильтрационно-емкостных параметров залежи. Большое количество публикаций, посвященных параметрическому оцениванию нефтеносных коллекторов по данным истории разработки [14–16], свидетельствует, с одной стороны, об актуальности темы, а с другой — о ее сложности.

Задачи оценки параметров распределенных сред по данным контроля состояния системы в конечном наборе точек (в скважинах) относится к классу плохообусловленных [12]. Основные рекомендации по повышению надежности оценок сводятся:

— к обеспечению высокого уровня информативности и незашумленности выборки данных натурных измерений состояния системы;

— учету априорной информации о свойствах среды, полученной фактографическими методами (технологии геофизического контроля) [7];

— редуцированию (упрощению) исходных моделей гидродинамики коллектора на основе пространственного осреднения состояний и параметров.

Каждую из вышеозначенных рекомендаций следует использовать в практике анализа. Однако в условиях реальной эксплуатации информативность выборки данных не подлежит регулировке, в то время как агрегация структуры модели (на основе упрощенных осреднений) до приведения в соответствие с информативностью данных натурных измерений вполне возможна. Именно указанный подход рассматривается далее.

Фрагмент зональной структуры коллектора, соответствующий трех- (пяти-) рядной системе заводнения, представленный на рис., отвечает минимальному уровню сложности осредненного конечномерного описания динамики пласта. Каждая *i*-я зона, окаймляющая скважину, характеризуется:

— среднезональным давлением $\overline{p}_i(t)$;

— удельным весом флюида $\gamma_i$;

— объемным расходом $q_i(t)$ (для добычи $q_i > 0$, для нагнетания $q_i < 0$);

— позицией среднезонального уровня $\Delta h_i$ относительно назначенной горизонтали.

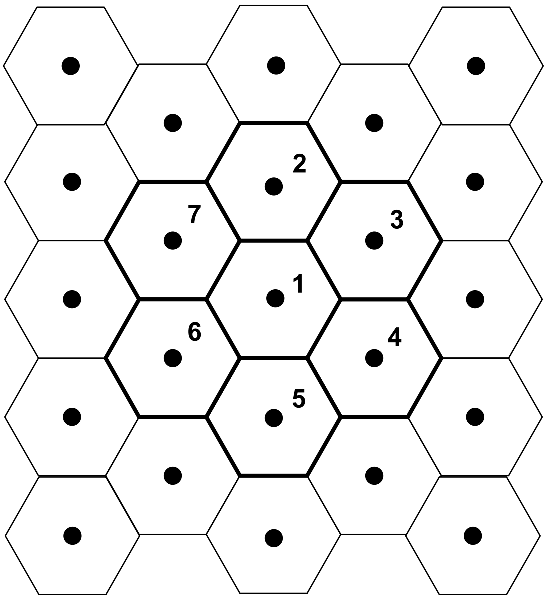


**Рис.** Трехрядная схема заводнения нефтеносного пласта

Согласно линейной теории фильтрации [2, 13], гидродинамика коллектора с объявленной структурой зональных осреднений задается системой уравнений объемных гидроупругих балансов

$$
\begin{aligned}
&\varphi_1 \dot{p}_1(t) = q_{21}(t) + q_{31}(t) + q_{41}(t) + q_{51}(t) + q_{61}(t) + q_{71}(t) - q_1(t) + \delta q_1,\\
&\varphi_2 \dot{p}_2(t) = -q_{21}(t) + q_{72}(t) - q_{23}(t) + q_{k2}(t) - q_2(t) + \delta q_2,\\
&\varphi_3 \dot{p}_3(t) = -q_{31}(t) + q_{23}(t) - q_{34}(t) + q_{k3}(t) - q_3(t) + \delta q_3,\\
&\varphi_4 \dot{p}_4(t) = -q_{41}(t) + q_{34}(t) - q_{45}(t) + q_{k4}(t) - q_4(t) + \delta q_4,\\
&\varphi_5 \dot{p}_5(t) = -q_{51}(t) + q_{45}(t) - q_{56}(t) + q_{k5}(t) - q_5(t) + \delta q_5,\\
&\varphi_6 \dot{p}_6(t) = -q_{61}(t) + q_{56}(t) - q_{67}(t) + q_{k6}(t) - q_6(t) + \delta q_6,\\
&\varphi_7 \dot{p}_7(t) = -q_{71}(t) + q_{67}(t) - q_{72}(t) + q_{k7}(t) - q_7(t) + \delta q_7,
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где $q_{ij}(t) = -q_{ji}(t) = w_{ij}(p_i(t) - p_j(t))$ — межзонные перетоки;

$p_i(t) = \overline{p}_i(t) - \gamma_i \Delta h_i$ — приведенные к единой горизонтали давления в зонах;

$\delta q_i$ — возможная ошибка приведения, обусловленная неточной информацией о $p_i$ и $\Delta h_i$;

$\varphi_i = \beta_n m V_i$ — гидроупругий объем вмещающих пустот *i*-й зоны с коэффициентом пористости $m$ и упругости $\beta_n$;

$w_{ij} = w_{ji}$ — гидропроводность перехода между *i*-й и *j*-й сопряженными зонами;

$q_{ki}(t) = 3w_{ki}(p_{ki} - p_i(t))$ — краевое питание зон внешнего окаймления с краевым давлением $p_{ki}$ и гидропроводностью $3w_{ki}$.

Под задачей идентификации гидродинамических параметров центральной зоны ($i = 1$) понимается правило оценивания (вычислений) вектора неизвестных параметров модели (1)

$$\mathbf{c} = [w_{12}\ w_{13}\ w_{14}\ w_{15}\ w_{16}\ w_{17}\ \tau_1\ \delta q_1]^T \tag{2}$$

по выборке данных измерений

$$I =< p_1(k), ..., p_7(k), q_1(k), ..., q_7(k), k = 1, N >, \tag{3}$$

что можно отразить формальным отношением

$$\hat{\mathbf{c}} = U(I_1), \tag{4}$$

где $p_i(k) = p_i(t_k)$, $t_{k+1} = t_k + \Delta t$, $\Delta t$ — шаг измерений по времени, $\hat{\mathbf{c}}$ — оценка вектора $\mathbf{c}$.

Как ранее отмечалось, рассматриваемая задача относится к плохообусловленным, что при действии шумов измерений

$$I_\xi =< p_{ui}(k), q_{ui}(k), k = 1, N >,$$

где $p_{ui}(k) = p_i(k) + \xi_{Pi}(k)$, $q_{ui}(k) = q_i(k) + \xi_{qi}(k)$, приводит к значительным ошибкам параметрического оценивания. Разность $\mathbf{c} - \hat{\mathbf{c}}$ может достигать кратных отличий от номинала.

Рассмотренные далее алгоритмы идентификации основаны на правилах редуцирования структур с целью улучшения свойств устойчивости оценок. Рассмотрим классический случай гидропрослушивания [5], когда варьируется режим эксплуатации центральной зоны: $q_1(k) -$ var, а зоны окаймления $q_i(k), p_{ki}$ $-$ const работают в квазистатическом режиме без собственных возмущений. Рассматриваемый вариант возмущения одной скважины наиболее ущербный по критерию информативности выборки данных. Однако заметим, что величины $q_i, i = \overline{2, 7}$ могут быть ненулевыми.

Основываясь на (1) и указанных обозначениях, прприведем первое уравнение системы к регрессионному виду

$$p_1(k) = \mathbf{c}_1{}^T \mathbf{н}_1(k) + \mathbf{a}_1{}^T \mathbf{x}_1(k), \quad k = 1, N, \tag{5}$$

где регрессоры переменных окаймления

$$\mathbf{x}_1(k) = [x_2(k)\ x_3(k) ...\ x_7(k)]^T \tag{6}$$

пересчитаны в отклонениях $x_i(k) = p_i(k) - p_{0i}$ от средних $p_{0i} = \sum_{i=1}^{N} p_i(k)/N$.

Соответствующий вектор параметров $\mathbf{a}_1$ удовлетворяет отношениям

$$\mathbf{1}_6^{\,T}\mathbf{a}_1 = a_{12} + a_{13} + a_{14} + a_{15} + a_{16} + a_{17} = 1, \quad a_{1i} \ge 0\ , \tag{7}$$

что следует из условий приведения

$$a_{1i} = w_{1i} / w_1, \quad w_1 = \sum_{i=1}^{7} w_{1i}, \quad w_{1i} \ge 0\ . \tag{8}$$

Регрессоры основной динамики центральной зоны имеют вид

$$\mathbf{н}_1(k) = [1 \quad -q_1(k) \quad -\dot{p}_1(t)]^T\ , \tag{9}$$

а соответствующий вектор приведенных параметров записывается следующим образом:

$$\mathbf{c}_1 = [\Delta q_1 \quad b_1 \quad T_1]^T\ , \tag{10}$$

где $b_1 = 1/w_1, \quad T_1 = \tau_1 / w_1, \quad \Delta q_1 = \delta q_1 + \sum_{i=2}^{7} a_{1i} p_{0i}$ .

Представление модели объекта идентификации в виде (5) позволяет выделить информативные регрессоры доминирующих процессов $\mathbf{н}_1(k)$ и переменные вторичных процессов $\mathbf{x}_1(k)$ с малой вариабельностью компонент. Отсюда следует, что для повышения надежности процедуру идентификации выгодно строить по итеративной схеме с чередованием этапов МНК-оценивания параметров $\mathbf{c}_1$ основных и $\mathbf{a}_1$ вторичных процессов [3, 10, 11]

$$\begin{cases} F_{11}\,\hat{\mathbf{c}}_1(j) = b_1 - F_{12}\,\hat{\mathbf{a}}_1(j-1), \\ F_{22}\,\hat{\mathbf{a}}_1(j) = b_2 - F_{21}\,\hat{\mathbf{c}}_1(j), \end{cases} \tag{11}$$

где

$$F_{11} = \sum_{k=1}^{N} \lambda_1(k)\mathbf{н}_1(k)\mathbf{н}_1(k)^T\ ,\ b_1 = \sum_{k=1}^{N} \lambda_1(k)\mathbf{н}_1(k)p_1(k)\,,$$

$$F_{22} = \sum_{k=1}^{N} \lambda_2(k)\mathbf{x}_1(k)\mathbf{x}_1(k)^T\ ,\ b_2 = \sum_{k=1}^{N} \lambda_2(k)\mathbf{x}_1(k)p_1(k)\,,$$

$$F_{12} = \sum_{k=1}^{N} \lambda_1(k)\mathbf{н}_1(k)\mathbf{x}_1(k)^T\ ,\ F_{21} = \sum_{k=1}^{N} \lambda_2(k)\mathbf{x}_1(k)\mathbf{н}_1(k)^T$$

а $\lambda_1(k) \ge 0$ и $\lambda_2(k) \ge 0$ — последовательности нормирующих коэффициентов. Возможно, высокий уровень обусловленности матрицы $F_{22}$ в раздельной схеме итеративной идентификации (11) не искажает оценки параметров $\mathbf{c}_1$ основной динамики и в то же время выделяет проблему обеспечения устойчивости оценок параметров окаймления $\mathbf{a}_1$ на основе агрегации переменных вектора $\mathbf{x}_1(k)$ с удалением линейно-зависимых компонент. Кроме того, оценки вектора $\mathbf{a}_1$, согласно (7), должны удовлетворять условию $\mathbf{1}_6^{\,T}\,\hat{\mathbf{a}}_1(j) = 1$, что видоизменяет алгоритм расчета $\hat{\mathbf{a}}_1(j)$ в сравнении с (11).

Рассмотрим указанный подход детальнее. Для этого перепишем регрессионную модель (5) в виде

$$a_{12}\mathbf{x}_2 + a_{13}\mathbf{x}_3 + a_{14}\mathbf{x}_4 + a_{15}\mathbf{x}_5 + a_{16}\mathbf{x}_6 + a_{17}\mathbf{x}_7 = \mathbf{b}\,, \tag{12}$$

где $\mathbf{x}_i = [x_i(1)\,...\,x_i(N)]^T$, $\mathbf{b} = [b(1)\,...\,b(N)]^T$, $b(k) = p_1(k) - \mathbf{c}_1{}^T \mathbf{н}_1(k)$. Выведем процедуру редуцирования на основе ν-ортогонализации [4] в предположении, что вектор $\mathbf{b}$, а вернее, его оценки априорно заданы.

Переход от $\mathbf{x}_i$ к соответствующей системе ортогональных векторов $\mathbf{z}_i$ ($\mathbf{z}_i{}^T\mathbf{z}_j = 0, \quad i \neq j, \quad i, j \in \{2, ..., 7\}$) осуществляется на основе процедуры Грамма — Шмидта

$$\begin{cases} \mathbf{z}_2 = \mathbf{x}_2, \\ \mathbf{z}_3 = \mathbf{x}_3 - \lambda_{32}\mathbf{z}_2, \quad \lambda_{32} = \mathbf{x}_3{}^T\mathbf{z}_2 / \|\mathbf{z}_2\|^2, \\ ...\ \ ...\ \ ...\ \ ...\ \ ...\ \ ...\ \ ...\ \ ... \\ \mathbf{z}_7 = \mathbf{x}_7 - \lambda_{72}\mathbf{z}_2 - ... - \lambda_{76}\mathbf{z}_6, \quad \lambda_{7i} = \mathbf{x}_7{}^T\mathbf{z}_i / \|\mathbf{z}_i\|^2, \quad i < 7. \end{cases} \tag{13}$$

Пусть $I_\nu \subset I = \{2, 3, ..., 7\}$ — индексное множество ν-зависимых векторов, определенное условием

$$I_\nu = \{i : \|\mathbf{z}_i\| < \nu\}. \tag{14}$$

Полагая в (13) $\mathbf{z}_i = \mathbf{0}$, $\lambda_{ji} = 0$, $i \in I_\nu$, переходим к системе ν-ортогонального разложения векторов $\mathbf{x}_i$, $i \in I$, по сокращенному ортогональному базису, например, для $I_\nu = \{4, 6\}$ имеем

$$\begin{cases} \mathbf{x}_2 = \mathbf{z}_2, \\ \mathbf{x}_3 = \lambda_{32}\mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_3, \\ \mathbf{x}_4 = \lambda_{42}\mathbf{z}_2 + \lambda_{43}\mathbf{z}_3, \\ \mathbf{x}_5 = \lambda_{52}\mathbf{z}_2 + \lambda_{53}\mathbf{z}_3 + \mathbf{z}_5, \\ \mathbf{x}_6 = \lambda_{62}\mathbf{z}_2 + \lambda_{63}\mathbf{z}_3 + \lambda_{65}\mathbf{z}_5, \\ \mathbf{x}_7 = \lambda_{72}\mathbf{z}_2 + \lambda_{73}\mathbf{z}_3 + \lambda_{75}\mathbf{z}_5 + \mathbf{z}_7. \end{cases} \tag{15}$$

Подставляя (15) в систему (12) и скалярно домножая результат поочередно на $\mathbf{z}_i$, $i \in I \setminus I_\nu$, приходим к системе уравнений относительно исходных параметров $a_{1i}$

$$\begin{cases} a_{12} + \lambda_{32}a_{13} + \lambda_{42}a_{14} + \lambda_{52}a_{15} + \lambda_{62}a_{16} + \lambda_{72}a_{17} = \mathbf{z}_2{}^T\mathbf{b} / \|\mathbf{z}_2\|^2, \\ \qquad a_{13} + \lambda_{43}a_{14} + \lambda_{53}a_{15} + \lambda_{63}a_{16} + \lambda_{73}a_{17} = \mathbf{z}_3{}^T\mathbf{b} / \|\mathbf{z}_3\|^2, \\ \qquad\qquad a_{15} + \lambda_{65}a_{16} + \lambda_{75}a_{17} = \mathbf{z}_5{}^T\mathbf{b} / \|\mathbf{z}_5\|^2, \\ \qquad\qquad\qquad a_{17} = \mathbf{z}_7{}^T\mathbf{b} / \|\mathbf{z}_7\|^2. \end{cases}$$

Запишем систему в векторно-матричной форме

$$Л_Б\mathbf{a}_Б + Л_С\mathbf{a}_C = \mathbf{b}_Б\,,$$

где $\mathbf{a}_Б = [a_{12}\ a_{13}\ a_{15}\ a_{17}]^T$ — вектор базовых параметров, $\mathbf{a}_C = [a_{14}\ a_{16}]^T$ — вектор свободных параметров,

$$Л_Б=\begin{bmatrix}1 & \lambda_{32} & \lambda_{52} & \lambda_{72}\\ 0 & 1 & \lambda_{53} & \lambda_{73}\\ 0 & 0 & 1 & \lambda_{75}\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},\quad Л_С=\begin{bmatrix}\lambda_{42} & \lambda_{62}\\ \lambda_{43} & \lambda_{63}\\ 0 & \lambda_{65}\\ 0 & 0\end{bmatrix},\quad \mathbf{b}_Б=\begin{bmatrix}\mathbf{z}_2{}^T\mathbf{b}/\|\mathbf{z}_2\|^2\\ \mathbf{z}_3{}^T\mathbf{b}/\|\mathbf{z}_3\|^2\\ \mathbf{z}_5{}^T\mathbf{b}/\|\mathbf{z}_5\|^2\\ \mathbf{z}_7{}^T\mathbf{b}/\|\mathbf{z}_7\|^2\end{bmatrix},$$

или

$$\mathbf{a}_Б+Л_{БС}\mathbf{a}_С=\mathbf{a}_0,\quad Л_{БС}=Л_Б^{-1}Л_С,\quad \mathbf{a}_0=Л_Б^{-1}\mathbf{b}_Б,$$

Прямой проверкой $Л_Б\cdot Л_Б^{-1}=I$ убеждаемся в справедливости определения

$$Л_Б^{-1}=\left[\begin{array}{c:c:c:c}1 & -\lambda_{32} & \lambda_{32}\lambda_{53}-\lambda_{52} & \lambda_{32}(\lambda_{73}-\lambda_{53}\lambda_{75})+\lambda_{52}\lambda_{75}-\lambda_{71}\\ 0 & 1 & -\lambda_{53} & \lambda_{53}\lambda_{75}-\lambda_{71}\\ 0 & 0 & 1 & -\lambda_{75}\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{array}\right],$$

из чего следует

$$Л_С=\left[\begin{array}{c:c}\lambda_{42}-\lambda_{43}\lambda_{32} & \lambda_{62}-\lambda_{63}\lambda_{32}+\lambda_{65}(\lambda_{32}\lambda_{53}-\lambda_{52})\\ \lambda_{43} & \lambda_{63}-\lambda_{65}\lambda_{53}\\ 0 & \lambda_{65}\\ 0 & 0\end{array}\right],$$

что соответствует структуре системы

$$\begin{cases}a_{12}+\alpha_{42}a_{14}+\alpha_{62}a_{16}=a_{12}^0,\\ a_{13}+\alpha_{43}a_{14}+\alpha_{63}a_{16}=a_{13}^0,\\ a_{15}+\alpha_{65}a_{16}=a_{15}^0,\\ a_{17}=a_{17}^0.\end{cases}\tag{17}$$

Обнуляя вектор свободных переменных $\mathbf{a}_C=0$, получаем огрубленное представление модели (12) в виде

$$a_{12}^0\mathbf{x}_2+a_{13}^0\mathbf{x}_3+a_{15}^0\mathbf{x}_5+a_{17}^0\mathbf{x}_7=\mathbf{b}\,.\tag{18}$$

Однако в общем случае ν-редуцированная модель объекта, согласно (17), имеет представление

$$(a_{12}+\alpha_{42}a_{14}+\alpha_{62}a_{16})\mathbf{x}_2+(a_{13}+\alpha_{43}a_{14}+\alpha_{63}a_{16})\mathbf{x}_3+(a_{15}+\alpha_{65}a_{16})\mathbf{x}_5+a_{17}\mathbf{x}_7=\mathbf{b}\,,$$

что в сопоставлении с (12) устанавливает факт ν-зависимости следующего характера:

$$\begin{cases}\mathbf{x}_4=\alpha_{42}\mathbf{x}_2+\alpha_{43}\mathbf{x}_3,\\ \mathbf{x}_6=\alpha_{62}\mathbf{x}_2+\alpha_{63}\mathbf{x}_3+\alpha_{65}\mathbf{x}_5.\end{cases}\tag{19}$$

Именно такой характер зависимости был предопределен примером (15) с $I_\nu=\{4,6\}$.

Полученная система уравнений (17) по сути выступает результатом второго этапа решения задачи идентификации в итеративной схеме (11). Технология ν-ортогонального редуцированная системы вторичных процессов выявила факт, что в силу линейной зависимости векторов $\mathbf{x}_4, \mathbf{x}_6$ (19) параметры передач $a_{14}, a_{16}$ не могут быть надежно выделены.

Последующий анализ связан с приемами формального доопределения вектора параметров окаймления $\mathbf{a}^T = \left[\mathbf{a}_Б{}^T \quad \mathbf{a}_C{}^T\right]$ на основе простейших правил регуляризации [1] и учета ограничений (7). Точку притяжения в схеме с регуляризацией определим в предположении радиальной однородности коллектора: $a_{1i}^{\alpha} = \dfrac{1}{6}$ или $\mathbf{a}_{Б\alpha} = \dfrac{1}{6}\mathbf{1}_Б$, $\mathbf{a}_{C\alpha} = \dfrac{1}{6}\mathbf{1}_C$, где $\mathbf{1}_Б = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1]^T$, $\mathbf{1}_C = [1 \quad 1]^T$. Отсюда регуляризованный критерий идентификации на основе (16), (17) запишется следующим образом:

$$J_\alpha = (\alpha_Б + \alpha_C)\left\|\hat{\mathbf{a}}_Б + Л_{БС}\,\hat{\mathbf{a}}_C - \mathbf{a}_0\right\|^2 + (1-\alpha_Б)\left\|\hat{\mathbf{a}}_Б - \mathbf{a}_{Б\alpha}\right\|^2 + (1-\alpha_C)\left\|\hat{\mathbf{a}}_C - \mathbf{a}_{C\alpha}\right\|^2 \to \min \quad (20)$$

при выполнении условий

$$\hat{\mathbf{a}}_Б^T\,\mathbf{1}_Б + \hat{\mathbf{a}}_C^T\,\mathbf{1}_C = 1,\ \ \mathbf{a} \ge 0, \qquad (21)$$

где $\alpha = \alpha_Б + \alpha_C$, $\alpha \in [0, 1]$.

Для (20) и (21) составим функцию Лагранжа

$$L_\alpha = J_\alpha - 2\lambda\left(\hat{\mathbf{a}}_Б^T\,\mathbf{1}_Б + \hat{\mathbf{a}}_C^T\,\mathbf{1}_C - 1\right)$$

и соответствующие уравнения для градиентов по настройкам $\hat{\mathbf{a}}_Б$ и $\hat{\mathbf{a}}_C$

$$\begin{cases} \alpha\left(\hat{\mathbf{a}}_Б + Л_{БС}\,\hat{\mathbf{a}}_C - \mathbf{a}_0\right) + (1-\alpha_Б)\left(\hat{\mathbf{a}}_Б - \mathbf{a}_{Б\alpha}\right) - \lambda\mathbf{1}_Б = \mathbf{0}, \\ \alpha\left(Л_{БС}^T\,\hat{\mathbf{a}}_Б + Л_{БС}^T Л_{БС}\,\hat{\mathbf{a}}_C - Л_{БС}^T\mathbf{a}_0\right) + (1-\alpha_C)\left(\hat{\mathbf{a}}_C - \mathbf{a}_{C\alpha}\right) - \lambda\mathbf{1}_C = \mathbf{0}. \end{cases}$$

Объединенная система уравнений запишется следующим образом:

$$F\mathbf{a} = \alpha F_0\mathbf{a}_0 + f_\alpha + \lambda\mathbf{1},$$

где $\mathbf{1}^T\mathbf{a} = 1$. В силу чего искомый алгоритм оценивания параметров окаймления принимает вид

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{a}} = F^{-1}\left(\alpha F_0\mathbf{a}_0 + f_\alpha + \lambda\mathbf{1}\right), \\ \lambda = \left(1 - \mathbf{1}^T F^{-1}\left(\alpha F_0\mathbf{a}_0 + f_\alpha\right)\right)/\mathbf{1}^T F^{-1}\mathbf{1}, \end{cases} \qquad (22)$$

где

$$F = \begin{bmatrix} (1+\alpha_C)I_Б & \alpha Л_{БС} \\ \alpha Л_{БС}^T & (1-\alpha_C)I_C + \alpha Л_{БС}^T Л_{БС} \end{bmatrix}, \quad F_0 = \begin{bmatrix} I_Б \\ Л_{БС}^T \end{bmatrix}, \quad f_\alpha = \begin{bmatrix} (1-\alpha_Б)\mathbf{a}_{Б\alpha} \\ (1-\alpha_C)\mathbf{a}_{C\alpha} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{1} = \begin{bmatrix} \mathbf{1}_Б \\ \mathbf{1}_C \end{bmatrix},$$

$$I_Б = \mathrm{diag}\{1\,1\,1\,1\}, \quad I_C = \mathrm{diag}\{1\,1\}.$$

Полученный алгоритм удовлетворяет условию равенства (21), однако не гарантирует условие положительности компонент вектора $\boldsymbol{a}$, что можно достигнуть настройкой (уменьшением) параметров регуляризации $\alpha_Б, \alpha_C \in [0, 1]$.

Структура решающего правила (22) в совокупности с итеративной процедурой (11) образует искомый результат по технологии устойчивого оценивания на основе метода ν-ортогонального редуцирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В.* Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1988. 288 с.

2. *Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Каневская Р.Д., Максимов В.М.* Подземная гидромеханика. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2005. 496 с.

3. *Ведерникова Ю.А., Соловьев И.Г.* Оценивание локальных гидродинамических характеристик нефтяных коллекторов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2005. № 12. С. 16–20.

4. *Голуб Дж., Ван Лоун Ч.* Матричные вычисления. М.: Мир, 1999. 548 с.

5. *Зайцев Ю.В., Балакиров Ю.А.* Технология и техника эксплуатации нефтяных и газовых скважин. М.: Недра, 1986. 302 с.

6. *Закиров С.Н., Закиров Э.С., Индрунский И.М. и др.* Проблемы подсчета запасов, разработки и 3D компьютерного моделирования // Нефтяное хозяйство. 2007. № 5. С. 6–68.

7. *Ипатов А.И., Кременецкий М.И.* Геофизический и гидродинамический контроли разработки месторождений углеводородов. М.: РХД: Ин-т компьютерного моделирования, 2006. 780 с.

8. *Мухаметзянов Р.Н., Фахретдинов Р.Н., Стрижнев К.В. и др.* Аспекты применения геолого-гидродинамического моделирования для проектирования и мониторинга геолого-технических мероприятий // Нефтяное хозяйство. 2007. № 10. С. 86–89.

9. *РД 153-39.0-047-00.* Регламент по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газовых месторождений / Минтопэнерго. М., 2000.

10. *Соловьев И.Г.* Гидродинамическая модель и идентификация локальных участков нефтяных коллекторов в режиме нормальной эксплуатации // Изв. вузов. Нефть и газ. 2005. № 1. С. 42–47.

11. *Соловьев И.Г., Говорков Д.А.* Факторы устойчивости МНК-оценок параметров модели притока вертикальной скважины // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2009. № 9. С. 31–35.

12. *Форсайт Дж., Молер К.* Численное решение систем линейных алгебраических уравнений. М.: Мир, 1969. 168 с.

13. *Чарный И.А.* Подземная гидрогазодинамика. М.: Гостоптехиздат, 1963. 396 с.

14. *Gao G., Li G., Reynolds A. C.* A Stochastic Optimization Algorithm for Automatic History Matching // SPE 90065.

15. *Gu Y., Oliver D.S.* As Iterative Ensemble Kalman Filter for Multiphase Fluid Flow Data Assimilation // SPE 108438.

16. *Zhang D., Lu Z., Chen Y.* Dynamic Reservoir Data Assimilation with an Efficient Dimension-Reduced Kalman Filter // SPE 95277.

*I.G. Solovyev, R.V. Raspopov*

*STABLE EVALUATION REGARDING PARAMETERS OF COLLECTORS BASING ON ν-ORTHOGONALIZATION*

*Subject to investigation being questions of improving evaluation stability with hydrodynamic parameters in local zones of oil-bearing collectors basing on methods of quasi-orthogonal reduction.*

***Oil-bearing collectors, water permeability, identification, orthogonalization, model.***