

Д. А. Говорков

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМА ИТЕРАТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СКВАЖИННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ПОМЕХИ ИЗМЕРЕНИЯ

Исследуются точность и надежность алгоритма последовательного оценивания параметров погружного насоса и призабойной зоны скважины в условиях действия осложняющих факторов эксплуатации и при наличии помех измерений с различными спектрами частот.

Оценка, параметры, погружной насос, призабойная зона, скважина, точность, надежность.

Данная статья продолжает исследования, описанные в [1–3], с использованием принятых в них обозначений переменных и параметров модели скважины с погружным насосом (рис. 1): $h(k)$ — динамический уровень газожидкостной смеси (ГЖС) в затрубном пространстве (ЗТ); $p(4, k)$ — давление газа в ЗТ; $p(8, k)$ — давление среды перед выпускным штуцером; $q(k)$ — расход жидкой фазы из насосно-компрессорной трубы (НКТ); $q(1, k)$ — приток в скважину; $m_r(l, k)$, $q_r(l, k)$, $h_r(l, k)$, $l = \{3; 4; 8\}$ — соответственно массовые, объемные расходы и эквивалентные высоты газовых шапок в характерных точках СС (прием насоса, верх ЗТ, верх НКТ); $u(k)$ — характеристика пуско-остановочного режима; w_1, w_2 — комплексные коэффициенты проводимости в уравнениях притока в скважину и в призабойную зону (ПЗ).

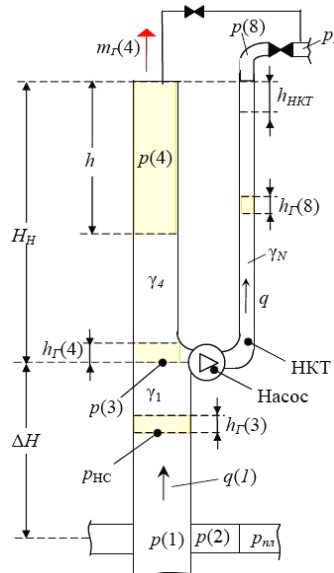


Рис. 1. Функционально-графическая схема скважины с погружным насосом

Для обеспечения необходимой точности в оценках гидродинамических параметров скважинной системы (СС) при наличии различного рода осложняющих факторов эксплуатации и помех измерения выходных сигналов, разрабатываемый алгоритм идентификации должен обладать следующими свойствами:

а) параметры насоса и притока следует определять отдельно, используя результаты идентификации одной модели для опознавания параметров другой;

б) порядок линейно-регрессионного уравнения в МНК схеме идентификации должен быть минимальным для исключения необходимости в численных расчетах старших производных;

в) часть параметров следует исключить из процедуры прямой идентификации ввиду их итеративной настройки;

г) структура алгоритма должна подразумевать возможность его настройки для учета действия различных осложняющих факторов.

Исходными для алгоритма идентификации являются данные о переходных процессах основных параметров скважины, доступных для измерения на ее устье в режиме реального времени: $I(k) = \langle h(k), p(4, k), p(8, k), u(k), l_H(k), m_T(4, k) \rangle$, с периодом квантования — T , а также относительно редкие измерения расхода жидкой фазы из НКТ с интервалом времени между замерамаи $T_k \geq T$. Алгоритм идентификации реализован в виде двухэтапной схемы (рис. 2).

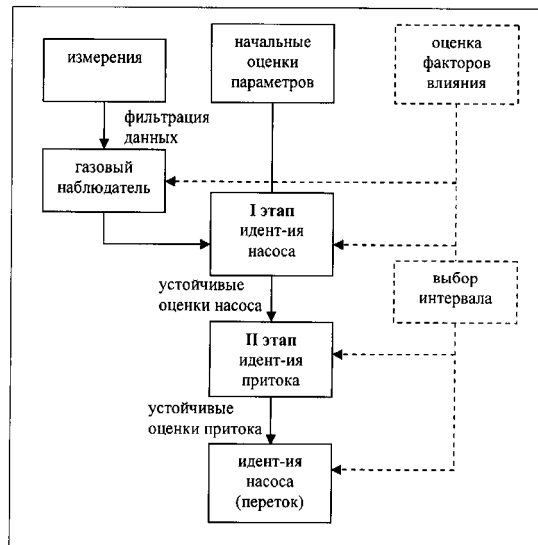


Рис. 2. Блок-схема алгоритма итеративной идентификации гидродинамики СС

Идентификация параметров насоса включает в себя схему итеративной настройки кусочно-постоянных параметров аппроксимации напорной характеристики насоса $[\lambda_0(i)], [\lambda_1(i)]$, где i — номер итерации, при заданных значениях точки сопряжения — q_1 (рис. 3, $\Delta h_H(k)$ — напор насоса).

Идентификация насоса производится на периоде пуска скважины $u(k) = 1$, по схеме МНК — минимизации невязки регрессионного уравнения:

$$q(k) = [\lambda_5(k)] + [\lambda_6(k)] \cdot h(7, k), \quad [\lambda_5(k)] = \frac{v_w[\lambda_0(k)]}{[\lambda_1(k)]}, \quad [\lambda_6(k)] = \frac{1}{v_w[\lambda_1(k)]}.$$

Период дискретизации выборки данных — T_k , $q(k)$ — доступно к измерению, $h(7, k)$ — восстанавливается на основе измерений $I(k)$ и данных с наблюдателя динамики газовых состояний [4].

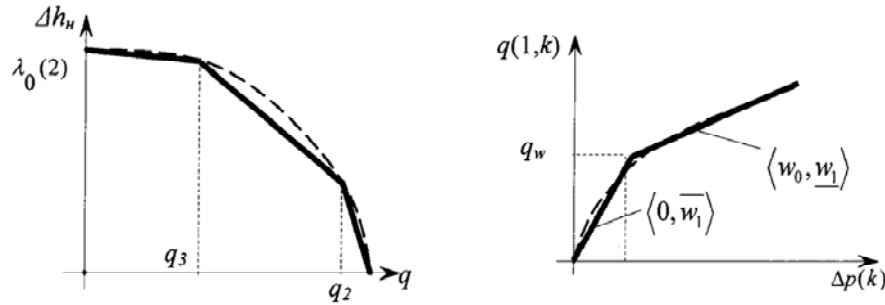


Рис. 3. Напорная характеристика насоса, индикаторная диаграмма притока

Итеративная идентификация параметра притока T_2 производится с использованием устойчивых оценок параметров аппроксимации и дебита насоса, полученных на первом этапе, что позволяет сформировать оценку притока в забой — $q(1, k)$. Вид регрессионного уравнения для идентификации:

$$p(3, k) - \gamma_1 h_T(3, k) = \begin{bmatrix} [w'_0] & [r_1] & r_2 & \frac{r_2 \Delta T_2(j)}{T_2(j)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -q(1, k) \\ -q_T(1, k) \\ q_{TT}(1, k) - q_T(1, k) \end{bmatrix},$$

где $(T_2(j)D + 1) \cdot q_T(1, k) = q(1, k)$, $(T_2(j)D + 1) \cdot q_{TT}(1, k) = q_T(1, k)$ — итеративно настраиваемые фильтры, j — номер текущей итерации, $[w'_0] = P_{Пл} - \gamma_1 \Delta H + \frac{[w_0]}{[w_1]}$,

$[r_1] = \frac{1}{[w_1]}$, $r_2 = \frac{1}{w_2}$, $\langle [w_0], [w_1] \rangle$ — кусочно-постоянные параметры аппроксимации диаграммы притока (рис. 2, $\Delta p(k)$ — депрессия на притоке).

Результатом идентификации притока служит вектор оценки параметров: $\mathbf{\hat{\theta}}_{ПЗ}(j) = [w_{01}(j), w_{11}(j), w_{02}(j), w_{12}(j), P_{Пл}(j), w_2(j), T_2(j)]^T$.

Критериями сходимости результатов идентификации насоса $\varepsilon_1(i)$ и притока $\varepsilon_2(j)$ являются среднеквадратические отклонения (СКО) значений параметров на текущей итерации от их значений на предыдущей итерации. Для оценки точности результатов алгоритма вводятся критерии отклонений значений параметров на текущей итерации от их истинных значений:

$$\rho_1(i) = \sqrt{\left(\frac{(\hat{\lambda}_{01}(i) - \lambda_{01}) + (\hat{\lambda}_{02}(i) - \lambda_{02}) + (\hat{\lambda}_{11}(i) - \lambda_{11}) + (\hat{\lambda}_{12}(i) - \lambda_{12})}{\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{11} + \lambda_{12}} \right)^2} \quad \text{— для насоса,}$$

$$\rho_2(j) = \sqrt{\left(\frac{\hat{T}_2(j) - T_2}{T_2} \right)^2}, \quad \rho_3(j) = \sqrt{\left(\frac{\mathbf{\hat{\theta}}_{ПЗ}(j) - \mathbf{\theta}_{ПЗ}}{\mathbf{\theta}_{ПЗ}} \right)^2} \quad \text{— для притока.}$$

Истинные (модельные) значения итеративно настраиваемых параметров насоса и притока представлены в табл. 1 (q_1 , q_w — значения параметров точек переключения для аппроксимированных кривых насоса и притока).

Таблица 1

Значения параметров модели входных данных

$\lambda_{01}, км$	$\lambda_{11}, \frac{км \cdot сут}{м^3}$	$\lambda_{02}, км$	$\lambda_{12}, \frac{км \cdot сут}{м^3}$	$q_2, \frac{м^3}{сут}$	T_2	$q_w, \frac{м^3}{сут}$
2,376	0,0051	7	0,02	310	0,0745	50

В данной работе анализируется точность и устойчивость алгоритма раздельной идентификации параметров насоса и притока в условиях действия газового фактора и при наличии нелинейного притока. Изменения уровня жидкости в НКТ не происходит — $h_{НКТ}(k) = 0$, $k \in [k(0), k(7)]$ дебита жидкости из НКТ после останова насоса нет — $q(k) = 0$, $k \in [k(4), k(7)]$ (рис. 4).

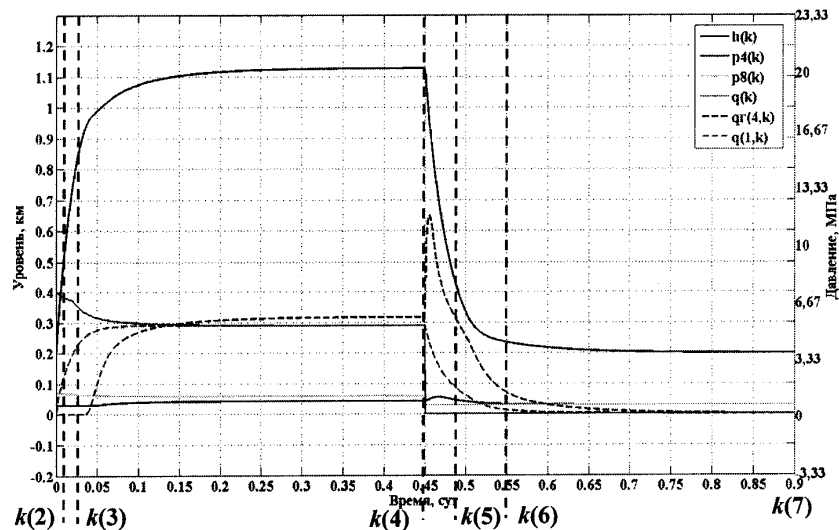


Рис. 4. Графики переходных процессов основных параметров СС

В табл. 2 представлены результаты анализа точности работы алгоритма при различных уровнях начальных отклонений оценок насоса (рис. 5) и притока, при этом точки сопряжения q_1 и q_w заданы точно.

Таблица 2

Результаты эксперимента по анализу точности идентификации насоса и притока

λ_{01}	λ_{11}	λ_{02}	λ_{12}	$\rho_1(0), \%$	$\rho_1(1), \%$	T_2	$\rho_2(0), \%$	$\rho_2(1), \%$
2.24166	0.00416	6.834	0.019	4	0	0,0596	20	0
3.0833	0.00833	5.667	0.0166	55	0.03	0,0417	44	0.1

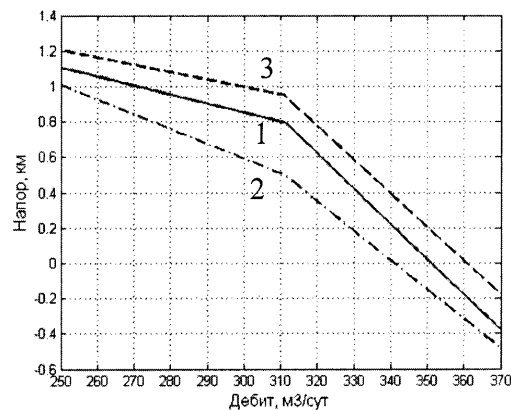


Рис. 5. Аппроксимированные напорные характеристики насоса:
1 — исходная; 2, 3 — эксперимент

Как видно из табл. 2, представленный алгоритм обеспечивает высокую точность результатов идентификации параметров насоса и притока при их значительных начальных отклонениях. В то же время наличие помех измерений входных сигналов, и в особенности в измерениях динамического уровня $h(k)$, способно существенно повлиять на точность результатов оценивания [5]. Для повышения устойчивости алгоритма используется фильтрация сигнала с помощью непараметрических фильтров:

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=-l}^l v(i)y(k+i),$$

где $y(k)$ — исходный зашумленный сигнал, l — ширина фильтра, $\sum_{i=-l}^l v(i) = 1$ —

нормированная весовая функция

В эксперименте по надежности работы представленного алгоритма в сигнал измерений динамического уровня $h(k)$ вносилась искусственная помеха с интенсивностью ε_h , заданной в процентах от всего диапазона изменения $h(k)$. Кроме того, вводились начальные ошибки в оценках параметров насоса и притока: $\rho_1(0) = 55\%$, $\rho_2(0) = 45\%$. В качестве весовой функции фильтра была выбрана

функция типа «конус»: $v(i) = \begin{cases} c(1 - |i|/l) & \text{при } |i| \leq l \\ 0 & \text{при } |i| > l \end{cases}$, где c — нормирующий множитель.

Основанием для останова итеративной настройки параметров является истинность неравенств $\varepsilon_2(j_1) < \eta_1$, $\varepsilon_2(j_2) < \eta_2$, где $j_{1,2}$ — номера итераций, η_1 , η_2 — заранее выбранные числа. Для данного эксперимента были выбраны следующие значения основных параметров: $\eta_1 = 1\%$, $\eta_2 = 0.001\%$, ширина фильтра $l = 50 \cdot T - 1\%$ от всей длины выборки измерений.

Результаты эксперимента по оценке надежности работы алгоритма идентификации при наличии помехи измерения в виде «белого» шума с интенсивностью ε_h представлены в табл. 3. Графики сходимости оценок параметров ПЗ даны на рис. 6.

Таблица 3

Результаты эксперимента по оценке надежности работы алгоритма идентификации в условиях действия помехи измерений

$\varepsilon_h, \%$	j_1	$\varepsilon_1(j_1), \%$	$\rho_1(j_1), \%$	j_2	$\varepsilon_2(j_2), \%$	$\rho_2(j_1), \%$	$\rho_3(j_1), \%$
1	2	0,74	0,03	3	≈ 0	≈ 0	1,6
5	2	0,97	0,04	3	0,76	≈ 0	> 100
10	2	0,73	0,04	4	4	≈ 0	>> 100

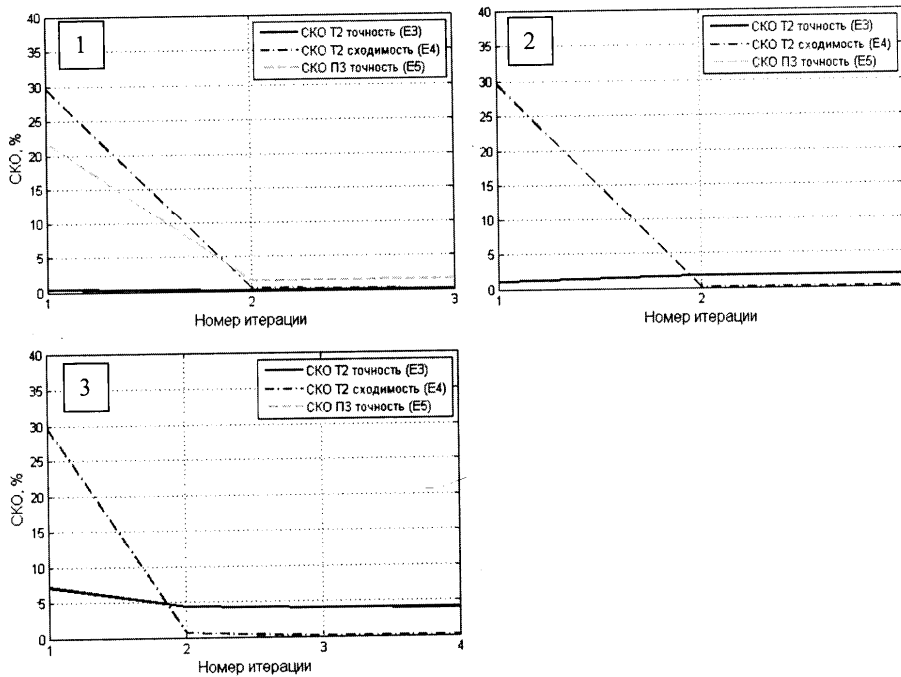


Рис. 6. Графики сходимости оценок параметров ПЗ при различных уровнях помехи измерений

Анализ результатов идентификации при наличии помехи измерений показал, что при росте интенсивности помехи точность оценок параметров притока падает. При этом параметры второго участка аппроксимации индикаторной диаграммы притока опознаются относительно точно и надежно. Поэтому данные параметры необходимо использовать для доопределения вектора $\bar{b}_{II}(j)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев И. Г., Говорков Д. А., Фомин В. В. Модель и динамика переходных режимов нефтяных скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2008. — № 6. — С. 11–17.
2. Соловьев И. Г., Говорков Д. А. Технология идентификации гидродинамики скважинной системы // Вторая Российская мультиконференция по проблемам управления (УИТ-2008). — Л.: Изд-во ЛЭТИ, 2008. — С. 123–127.

3. *Соловьев И. Г.* Гидродинамическая модель и идентификация локальных участков нефтеносных коллекторов в режиме нормальной эксплуатации // Изв. вузов: Нефть и газ. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. — № 1. — С. 42–47.

4. *Luenberg D. G.* An Introduction to Observers // IEEE Trans. On AC, 12, 1971. — P. 596–602.

5. <http://siam.tomsk.ru/>.

D. A. Govorkov

*STABILITY ANALYSIS OF ITERATIVE IDENTIFICATION OF ALGORITHM REGARDING
HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF WELL SYSTEM
UNDER MEASUREMENT DISTURBANCE*

Subject to investigation being accuracy and reliability regarding algorithm of successive evaluation characteristics of an immersible pump and well bottom zone under aggravating operational conditions and presence of measurement disturbances with different frequency spectres.

Evaluation, characteristics, immersible pump, bottom zone, well, accuracy, reliability.