

И. Г. Соловьев, В. В. Фомин

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОСВОЕНИЯ СКВАЖИНЫ С УЭЦН ПОСЛЕ ГЛУШЕНИЯ

*Статья посвящена разработке математической модели процесса освоения скважины с УЭЦН после глушения. Процесс освоения задается моделью «очистки» призабойной зоны пласта восходящим потоком добываемой жидкости. Приводится пример расчета динамического уровня, дается анализ полученных решений.*

Вопросы освоения скважин после глушения занимают ключевое место как в управлении разработкой месторождения, так и эксплуатации. В первом случае стремятся обеспечить проектные или прогнозируемые после геолого-технических мероприятий (ГТМ) показатели работы системы «пласт — скважина», во втором — в минимальной степени израсходовать эксплуатационный ресурс погружного оборудования при выводе скважины на режим. В критерий оптимального конструирования скважин кратковременный период освоения входит сильным возмущающим фактором задачи проектирования, пренебречь которым не представляется возможным. Например:

— Минимизация глубины подвески УЭЦН приводит к облегченному режиму работы установки с минимальным расходом эксплуатационного ресурса, металлоемкости конструкции. При этом существенно ужесточаются условия освоения, связанные с упреждением фактора срыва подачи, когда начальное значение коэффициента продуктивности значительно ниже, чем расчетно-номинальное, достигаемое в процессе откачки начальных объемов газожидкостной смеси (ГЖС) из призабойной зоны пласта (ПЗП).

— Необходимость подъема «тяжелых» жидкостей глушения (ГЖ), а также фракций механических примесей, обусловленных ГТМ, требует применения установок с повышенными мощностями. Однако после откачки начальных объемов жидкости и восстановления номинальных условий фильтрации в ПЗП избыточные мощности могут вызывать не режимные условия эксплуатации. Избыточная производительность в той или иной мере ведет к быстрому освоению эксплуатационного ресурса погружного оборудования, повышению рисков «полетов» [4] и избыточному энергопотреблению.

Существует множество методов освоения скважин после глушения [1, 2, 5]. Однако каждый из них, компенсируя те или иные осложняющие факторы запуска, не решает проблему полностью или порождает дополнительные задачи, требующие специальных исследований. Например, решение вопросов функциональной надежности электрических сетей и оборудования в условиях частотного регулирования скорости вращения погружного электродвигателя (ПЭД).

Оценка тех или иных проектных решений, обоснование главных факторов, определяющих условия и режимы освоения скважин, разработка критериев и методов регулирования в период запуска требуют адекватного математического описания динамических процессов освоения.

Рассмотрим построение математической модели, позволяющей проанализировать влияние факторов, осложняющих вывод скважины на номинальный режим работы.

Структурная схема эксплуатационной скважины, оборудованной установкой электроцентробежных насосов (УЭЦН), приведена на рис. 1, а, где указаны основные конструктивные параметры и динамические характеристики системы, отражающие процесс освоения:  $H_3$  — глубина забоя по вертикали;  $H_n$  — глубина погружения УЭЦН по вертикали;  $h_d$  — динамический уровень раздела фаз в затрубном пространстве;  $h_{ст}$  — статический уровень;  $P_1$  — давление в забое;  $P_2$  — среднепластовое давление вблизи скважины (контура питания);  $P_{зт}$  — давление в затрубном пространстве, выравненное с давлением в линии —  $P_l$ ;  $P_y$  — давление на устье;  $q$  — объемный расход ГЖС.

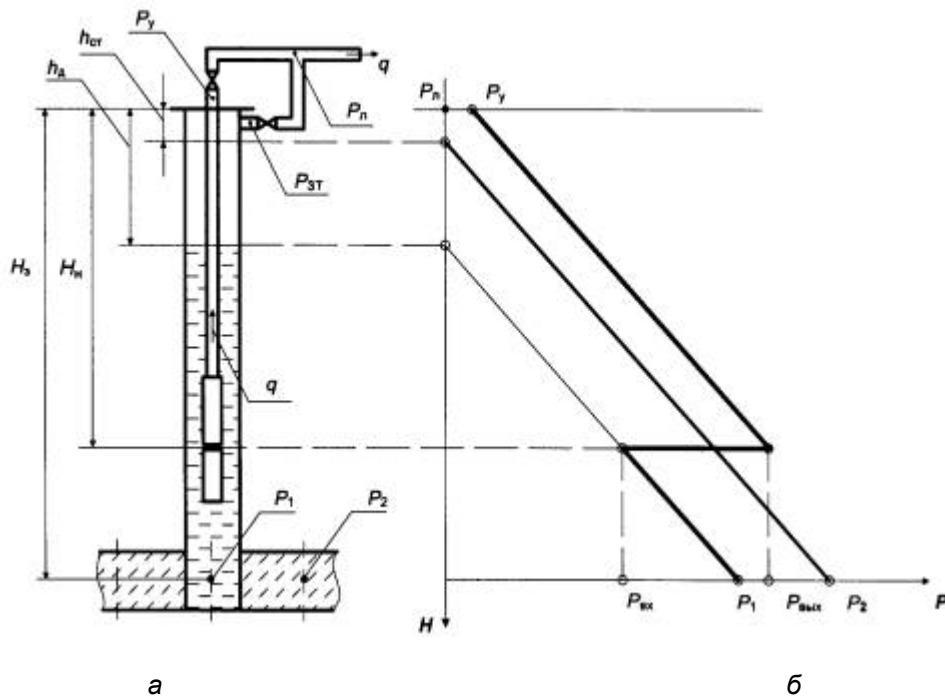


Рис. 1. Скважинная система

На рис. 1, б приведен линеаризованный график распределения давления в скважине по вертикали вдоль потока ГЖС. В условиях пренебрежения эффектом газлифта введенные переменные состояния связываются следующими линейными соотношениями:

— линеаризованная модель устьевого штуцера:

$$P_y(t) - P_n(t) = \gamma \cdot r_{ш} q(t) ;$$

— насосно-компрессорная труба (НКТ) — «верх» скважины:

$$P_{вх}(t) - P_y(t) = \gamma \cdot H_1 ;$$

— обсадная колонна — «низ» скважины:

$$P_1(t) - P_{вх}(t) = \gamma \cdot (H_s - H_1) ;$$

— гидродинамика ПЗП [3]:

$$\frac{S_0}{\gamma} P_1(t) = w_1(t) \cdot (P_2(t) - P_1(t)) - q(t), \quad (1)$$

где  $r_{ш}$  — гидросопротивление устьевого штуцера;  $S_0$  — площадь кольцевого сечения между обсадной колонной и НКТ;  $\gamma = \rho \cdot g$  — удельный вес ГЖС ( $\rho$  — плотность,  $g$  — ускорение свободного падения);  $w_1(t)$  — коэффициент продуктивности скважины, изменяющийся от малого значения  $w_1(0)$  до номинального  $w_1$  в процессе выноса засоряющих компонент ПЗП.

Моделирование работы насоса выполнено на основе его паспортной напорной характеристики, рассчитанной по воде (рис. 2) в координатах  $\langle q(t), \Delta h(t) \rangle$ , где

$$\Delta h(t) = \frac{1}{\gamma} (P_{вх}(t) - P_{вх}(t)). \quad (2)$$

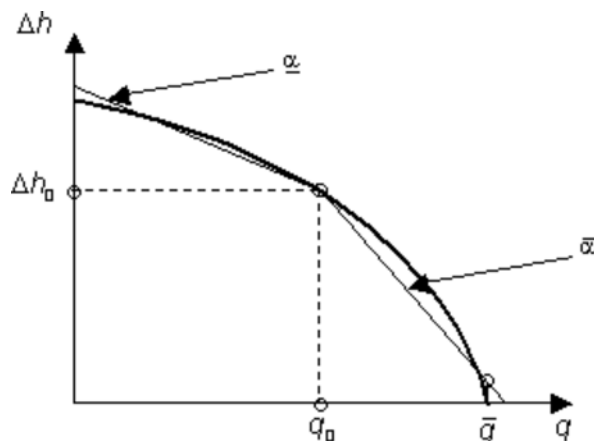


Рис. 2. Напорная характеристика насоса

На рис. 2 точка  $(q_0, \Delta h_0)$  соответствует номинальному (предпочтительному) режиму эксплуатации насоса с максимальным коэффициентом полезного действия (КПД). Используем данную точку как узел кусочно-линейной аппроксимации криволинейного графика. В этом случае модель насоса можно описать следующим выражением<sup>\*)</sup>:

$$\Delta h(t) - \Delta h_0 = -\underline{\alpha} \cdot (q(t) - q_0)_- - \bar{\alpha} \cdot (q(t) - q_0)_+, \quad (3)$$

$$q(t) \leq \bar{q},$$

где  $\underline{\alpha}$ ,  $\bar{\alpha}$  — соответствуют наклонам прямых (рис. 2). Для краткости модель (3) перепишем в виде:

$$\Delta h(t) = \Delta h_0 - [\alpha] \cdot (q(t) - q_0).$$

Пусть динамика «очистки» ПЗП (восстановление номинального значения коэффициента продуктивности  $w_1 - w_1(t)$ ) отвечает условию пропорциональности объему перекаченной через ПЗП жидкости, т. е.:

$$w_1 - w_1(t) \approx (w_1 - w_1(0)) \cdot e^{-\frac{1}{\tau_0} \int_0^t q(\tau) d\tau}$$

В этом случае уравнение для коэффициента продуктивности в дифференциальной форме может быть записано в виде:

$$\tau_0 \dot{w}_1(t) = (P_2(t) - P_1(t)) \cdot w_1(t) \cdot (w_1 - w_1(t)) \quad (4)$$

На основании ранее введенных соотношений для «низа» и «верха» скважины построим гидростатическую модель подъемника, приравнявая напорную характеристику насоса (3) и нагрузочную скважины. В результате получим:

$$\Delta h_0 - (r_w + [\alpha]) (q(t) - q_0) = H_s + r_w \cdot q_0 + \frac{1}{\gamma} (P_1 - P_2) + \frac{1}{\gamma \cdot w_1} q_1(t), \quad (5)$$

$$q(t) \leq \bar{q},$$

где принято

$$q_1(t) = w_1 \cdot (P_2 - P_1(t)). \quad (6)$$

Отсюда следует

$$q(t) - q_0 = [a_1] \cdot \left( a_0 - \frac{1}{\gamma \cdot w_1} q_1(t) \right), \quad q(t) \leq \bar{q}, \quad (7)$$

$$\text{где } a_0 = \Delta h_0 - H_s - r_w \cdot q_0 + \frac{1}{\gamma} (P_2 - P_n), \quad [a_1] = \frac{1}{r_w + [\alpha]}$$

Перейдем к относительной координате состояния коэффициента продуктивности скважины:

$$v(t) = \frac{w_1(t)}{w_1(t)}, \quad v(t) \in (0; 1). \quad (8)$$

Тогда на основании (1, 5–8) и в рамках принятых упрощений модель скважины, отражающая режим запуска в период освоения, запишется следующим образом:

$$\begin{cases} \tau_0 \dot{q}_1(t) = -v(t) \cdot q_1(t) + q(t), \\ \tau_s \dot{v}(t) = q_1(t) \cdot v(t) \cdot (1 - v(t)), \\ q(t) = \min \left\{ \bar{q}, q_0 + e(t) \right\}, \\ e(t) = \bar{a}_1 \cdot \left( a_0 - \frac{1}{\gamma \cdot w_1} q_1(t) \right)_- + \underline{a}_1 \cdot \left( a_0 - \frac{1}{\gamma \cdot w_1} q_1(t) \right)_+. \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{где } \tau_0 = \frac{S_0}{\gamma \cdot w_1}, \quad \bar{a}_1 = \frac{1}{(r_w + \bar{\alpha})}, \quad \underline{a}_1 = \frac{1}{(r_1 + r_w)}$$

Соотношение (5) для остановленной скважины (с выключенным насосом) приобретает вид:

$$-r_1 \cdot q(t) = \left( H_s + r_w \cdot q(t) + \frac{1}{\gamma} (P_n - P_2) + \frac{1}{\gamma \cdot w_1} q_1(t) \right)_-, \quad (10)$$

где  $r_1$  — гидросопротивление насоса восходящему ( $q(t) \geq 0$ ) потоку ГЖС. На практике возможная перемена направления тока жидкости  $q(t) < 0$  запрещена и блокируется обратными клапанами системы.

На основании (10) для остановленной скважины имеем:

$$q(t) = a_3 \cdot \left( a_2 - \frac{1}{\gamma \cdot w_1} q_1(t) \right)_+, \quad (11)$$

где

$$a_3 = \frac{1}{(r_1 + r_w)}, \quad a_2 = \frac{1}{\gamma} \cdot (P_2 - P_n) - H_s$$

Объединяя (9) и (11), получаем искомую модель скважины с УЭЦН в период освоения:

$$\begin{cases} \tau_0 \dot{q}_1(t) = -v(t) \cdot q_1(t) + q(t), \\ \tau_s \dot{v}(t) = q_1(t) \cdot v(t) \cdot (1 - v(t)), \\ q(t) = u(t) \min \left\{ \bar{q}, q_0 + e(t) \right\} + (1 - u(t)) \cdot q_s(t), \\ e(t) = \bar{a}_1 \cdot \left( a_0 - \frac{1}{\gamma \cdot w_1} q_1(t) \right)_- + \underline{a}_1 \cdot \left( a_0 - \frac{1}{\gamma \cdot w_1} q_1(t) \right)_+, \\ q_s(t) = a_3 \cdot \left( a_2 - \frac{1}{\gamma \cdot w_1} q_1(t) \right)_+. \end{cases} \quad (12)$$

где  $u(t)$  — индикатор режима работы насоса, который задается следующей функцией:  $u(t) = 1$  — насос включен,  $u(t) = 0$  — насос выключен.

Рассмотрим пример численного моделирования для скважинной системы, заданной следующими параметрами [4]:

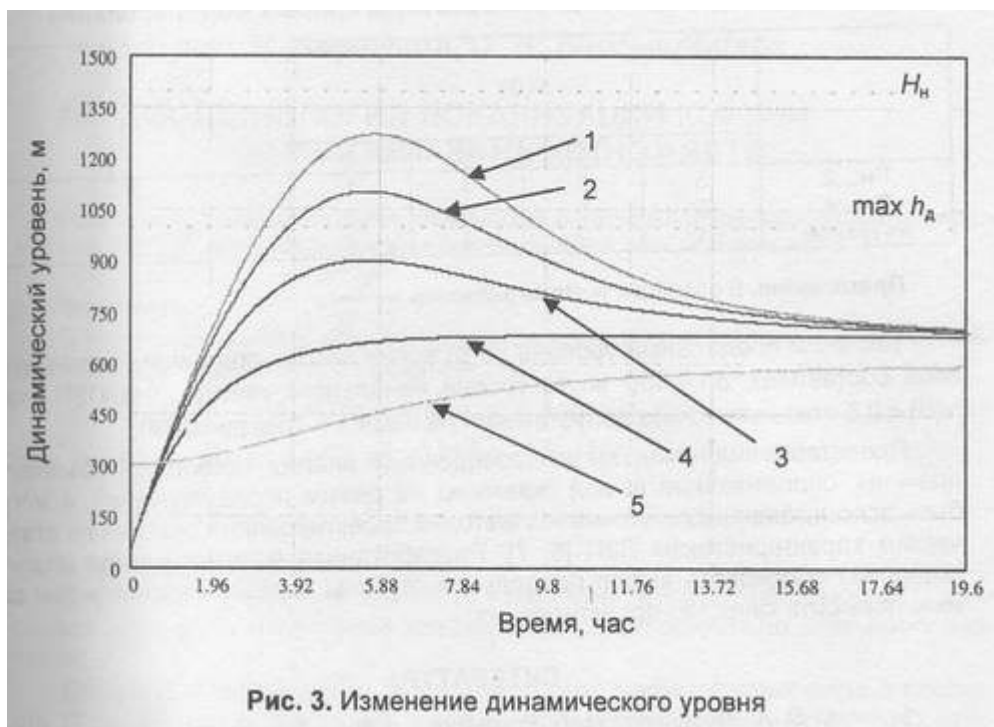
$H_3$ , м	1890	$P_2$ , МПа	16	$\tau_0$ , сут	0,01128
$H_H$ , м	1414	$P_n$ , МПа	1,4	$\alpha$	$2,5 \times 10^5$
$\Delta h_n$ , м	433	$w_H$ , м <sup>3</sup> /МПа×сут	18	$\beta$	$0,6 \times 10^5$
$q_0$ , м <sup>3</sup> /сут	92	$\gamma$ , кг/м <sup>2</sup> ×с <sup>2</sup>	9712		

На рис. 3, 4 приведены графики переходных процессов по  $h_d(t)$ , вычисленных по выражению:

$$h_d(t) = \frac{q_1(t)}{w_1 \cdot \gamma} - \frac{1}{\gamma} \cdot (P_2 - P_n) + H_3$$

Начальные условия, при которых выполнялись расчеты, отражены в таблице.

Полученные результаты моделирования свидетельствуют о том, что динамика переходных процессов по уровню  $h_d(t)$  в режиме освоения (кривые 1, 2, 3) отличается от типовых переходных режимов с постоянными  $w_1(t) = w_1$  (кривая 4) и характеризуется уровнем перерегулирования, который может быть критичным для априорно рассчитанной глубины подвески ( $H_H$ ) в номинальных условиях [5].





#### Исходные данные и идентификаторы кривых моделирования

	$v(0)$				$v(t)/v(0) = 0,5$
	0,2	0,3	0,5	1	
Рис. 3	3	3	3	1	3
Рис. 4	5	5	5	1	5
№ кривой	1	2	3	4	5

**Примечание.** В столбцах указаны значения  $\frac{\tau_s}{\tau_0 \cdot Q_0}$ .

Так, если предельный уровень погружения насоса под динамический уровень составляет  $\Delta h \approx 300$  м, то уровни начального «засорения» ПЗП ниже  $v(0) < 0,5$  оказываются не допустимыми (кривые 1 и 2 на рис. 3, 4).

Представленная модель и проведенный анализ позволяют объяснять причины, осложняющие вывод скважины на режим после глушения, и могут быть использованы для уточнения методик проектирования скважин по статическим характеристикам ПЗП [6, 7]. Разработанная математическая модель позволяет обосновать выбор предельной глубины подвески насоса и тем самым повысить качество проектирования.

#### Литература

1. Амлян В. А., Васильева Н. П. Вскрытие и освоение нефтегазовых пластов. М.: Недра, 1972. 336 с.
2. Булатов А. И., Качмар Ю. Д., Макаренко П. П., Яремийчук Р. С. Освоение скважин: Справ. пособие / Под ред. Р. С. Яремийчука. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. 427 с.
3. Ведерникова Ю. А., Соловьев И. Г. Разработка и использование гидродинамических моделей скважинных систем, оборудованных установками погружных электроцентробежных насосов // Вестн. кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2002. Вып. 1. С. 85–91.
4. Дарищев В. И., Ивановский В. Н., Ивановский Н. Ф. и др. Комплекс работ по исследованию и снижению частоты самопроизвольных расчленений (РС-отказов) скважинных насосных установок. М.: ВНИИОЭНГ, 2000. 84 с.
5. Мищенко И. Т. Скважинная добыча нефти: Учеб. пособие для вузов / РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. М.: Нефть и газ, 2003. 816 с.
6. Справочная книга по добыче нефти / Под ред. Ш. К. Гиматудинова. М.: Недра, 1974. 704 с.
7. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти / Р. С. Андриасов, И. Т. Мищенко, А. И. Петров и др.; под общ. ред. Ш. К. Гиматудинова. М.: Недра, 1983. 455 с.

I. G. Solovyev, V. V. Fomin

A MATHEMATICAL MODEL OF WELL COMPLETION FROM ECPU UPON KILLING

The article is devoted to developing a mathematical model of well completion from electric centrifugal pump unit (ECPU) upon killing. A completion process is set by a model of «cleaning» the bottom-hole formation zone with an upward flow of recovered fluid. The article quotes an example of computing dynamic level, analysing the obtained solutions.

---

\*) Выражение  $(a)_+$  означает:  $(a)_+ = \begin{cases} a, & \text{если } a > 0; \\ 0, & \text{если } a < 0. \end{cases}$  Аналогично определяется операция  $(a)_-$ .