

А.В. Клишев, И.Г. Соловьев

АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИКИ СКВАЖИННОЙ СИСТЕМЫ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЦН В СРЕДЕ SIMULINK

Создана модель вертикальной скважинной системы в среде Simulink, которая позволяет давать оценку равновесных состояний, исследовать гидродинамику скважины, а также проводить анализ критических состояний и оценивать допустимые пределы вариаций параметров.

Модель, скважинная система, гидродинамика, оценка.

Установки погружных электроцентробежных насосов (ЭЦН) играют в нефтедобывающей промышленности России огромную роль. Они предназначены для эксплуатации добывающих скважин различной глубины с различными свойствами продукции (вязкость, обводненность, состав нефти). Эффективность эксплуатации ЭЦН — первоочередная задача нефтедобывающих предприятий [1].

Для вычисления оптимальных режимов работы скважин с ЭЦН необходимы гидродинамические исследования — совокупность различных мероприятий, направленных на определение характеристик притока на основе измерения (вычисления) переменных состояния системы (расход, динамический уровень и давление) в работающем или остановленном режимах [2].

Модель, отображающая основные связи между ключевыми переменными состояния притока, насоса, подъемника и устья, построена в следующих предположениях:

- гидроупругая динамика призабойной зоны аппроксимируется дифференциальными уравнениями, устанавливающими объемный баланс между линейным притоком из коллектора и оттоком в забой скважины;

- газожидкостная смесь (ГЖС) в подъемнике считается не упругой и имеет в соответствующих интервалах фиксированные (средние) удельные веса;

- все нелинейные зависимости: напорная характеристика насоса, потери давления в штуцерах и насосно-компрессорной трубе (НКТ) — описываются линеаризованными и/или кусочно-линейными соотношениями.

Конструктивная схема вертикальной скважины представлена на рис. 1 (1).

Схема включает следующие компоненты: насосно-компрессорная труба; обсадная колонна; погружной частотно-регулируемый электроцентробежный насос; забой скважины.

Параметры конструкции: H_z — глубина забоя по вертикали; H_N — глубина подвески насоса; S_0 — площадь кольцевого сечения; $S_{\text{НКТ}}$ — площадь сечения НКТ; $r_{\text{Ш}}$, $r_{\text{НКТ}}$ — гидросопротивления устьевого штуцера и НКТ.

Параметры коллектора и флюида: γ_1 — удельный вес газожидкостного потока; p_1 — осредненное по объему давление флюида в призабойной зоне коллектора; h_4 — уровень жидкости над приемом насоса в затрубном пространстве (ЗТ), индекс u свидетельствует о состоянии насоса (1 — вкл. 0 — выкл.); p_4 — давление газа верха ЗТ; $p_{\text{л}}$ — давление в линейном нефтесборнике; $p_{\text{пл}}$ — давление пластовое.

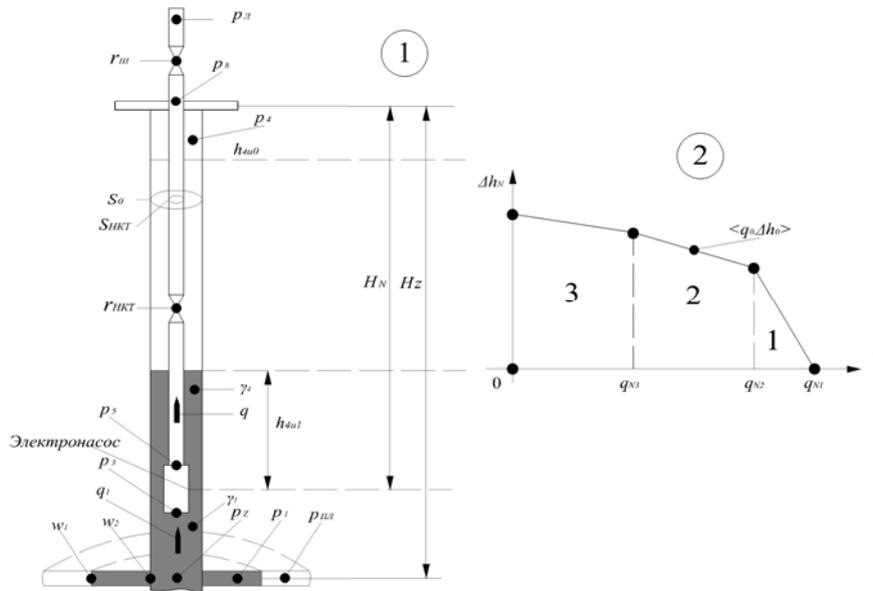


Рис. 1. Модель системы «пласт — скважина — насос»

Переменные состояния системы: $q_1(t)$ — объемный приток жидкости в забой скважины; $q(t)$ — расход, создаваемый насосом; $p_z(t)$ — давление в забое; $p_1(t)$ — давление в призабойной зоне; $h_4(t)$ — уровень жидкости над приемом насоса; $p_3(t)$ — давление на приеме насоса; $p_5(t)$ — давление на выкиде насоса; $p_8(t)$ — давление до устьевого штуцера; $p_{\text{л}}$ — давление в линейном нефтесборнике.

Модель равновесных состояний описывается следующей системой уравнений [3, 4]:

$$\begin{cases}
 q = \left(\frac{u \cdot v^2 \cdot \lambda_0(i) - H_z + (p_{\text{пл}} - p_{\text{л}}) / \gamma_1}{u \cdot v \cdot \lambda_0(i) + (1-u) \cdot r_N + r_{\text{ш}} + r_{\text{нкт}} + r_{\text{пл}} / \gamma_1} \right)_+, \\
 p_z = p_{\text{пл}} - r_{\text{пл}} \cdot q, \\
 p_3 = p_z - \gamma_1 \cdot (H_z - H_N), \\
 h'_4 = \frac{(p_3 - p_4)}{\gamma_4}, \\
 h_4 = \begin{cases} h'_4, & \text{если } h'_4 < H_N \\ H_N, & \text{иначе} \end{cases}, \\
 p_4^0 = \begin{cases} p_4, & \text{если } h_4 < H_N \\ p_3 - \gamma_4 \cdot H_N, & \text{иначе} \end{cases}, \\
 p_8 = p_{\text{л}} + \gamma_1 \cdot r_{\text{ш}} \cdot q, \\
 p_5 = p_8 + \gamma_1 \cdot (H_N + r_{\text{нкт}} \cdot q),
 \end{cases} \quad (1)$$

в которой $\lambda_0(i)$, $\lambda_1(i)$, $i = \{1, 2, 3\}$ — параметры кусочно-линейного графика напорной характеристики насоса при номинальной частоте питающего напряжения $v(t) = \omega(t)/\omega_0 = 1$ (рис. 1, 2), r_N — гидросопротивление остановленного насоса в условии фонтанирования.

Для напорной характеристики Δh_N справедливы соотношения:

$$\Delta h_N(t) = u \cdot v \cdot (\lambda_0(i) - \lambda_1(i) \cdot q),$$

$$i = \begin{cases} 1, & \text{если } q_N \in \nu[q_{N1}; q_{N2}], \\ 2, & \text{если } q_N \in \nu[q_{N2}; q_{N3}], \\ 3, & \text{если } q_N \in \nu[0; q_{N3}], \end{cases} \quad (2)$$

где коэффициенты модели из условий сопряжения линейных звеньев в точках сопряжения удовлетворяют равенствам:

$$q_{N1} = \frac{\lambda_0(1)}{\lambda_1(1)}, \quad q_{Ni} = \frac{\lambda_0(i) - \lambda_0(i-1)}{\lambda_1(i) - \lambda_1(i-1)}, \quad i \in \{2, 3\}. \quad (3)$$

Для анализа равновесных режимов эксплуатации, согласно (1), был разработан программный модуль в среде Simulink [5]. Структурная схема модуля изображена на рис. 2, где слева обозначены исходные настройки модели, а справа — выходные (вычисляемые) переменные состояния для включенного ($u = 1$) и выключенного ($u = 0$) состояния скважинной системы.

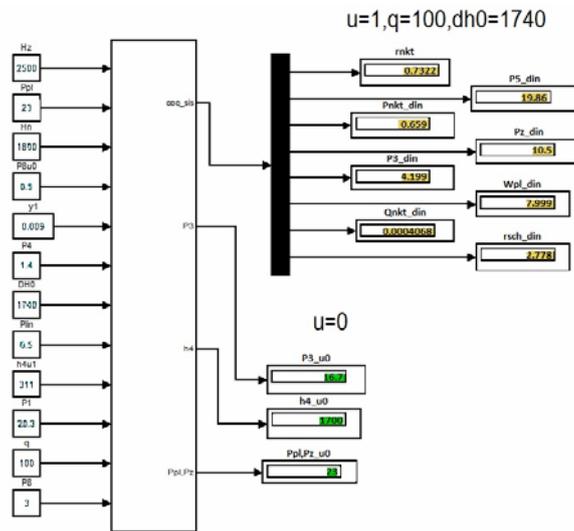


Рис. 2. Структурная схема модели равновесных состояний

Настроечные параметры и состояние модулируемого примера сведены в табл. 1 и 2. Результаты вычислительного анализа по условию упреждения выхода системы в нерезимное состояние срыва подачи $h_4 \leq h_4^{\min}$, где h_4^{\min} — минимальный допустимый уровень над приемом, при котором сохраняется еще стабильная работа насоса, представлены на рис. 3. Величина h_4^{\min} зависит от фазного состава, газового фактора и перепада давления $p_{\text{НС}} - p_3$, где $p_{\text{НС}}$ — давление насыщения. В расчетах принято: $h_4^{\min} = 100$ м.

Таблица 1

Параметры графика напорной характеристики

i	$\lambda_0(i)$	$\lambda_1(i)$	q_{Ni}
1	7860	43.67	180
2	2600	8.6	150
3	2300	2.6	50

Таблица 2

Исходные данные для моделирования

HZ (м)	HN (м)	γ_1 (МПа/м)	p_4 (МПа)	p_l (МПа)	$p_{пл}$ (МПа)	h_{4u1} (м)	p_{8u0} (МПа)	p_{8u1} (МПа)	p_1 (МПа)
2500	1800	0,009	1,4	0,5	23	311	0,5	3	20,3

На рис. 3 (1) отмечены вариации динамического уровня h_4 при изменении удельного веса $\gamma_1 \in [0,008; 0,012]$ МПа/м. На рис. 3 (2) представлены график распределений давлений для $p_{пл} \in [21; 25]$ МПа/м.

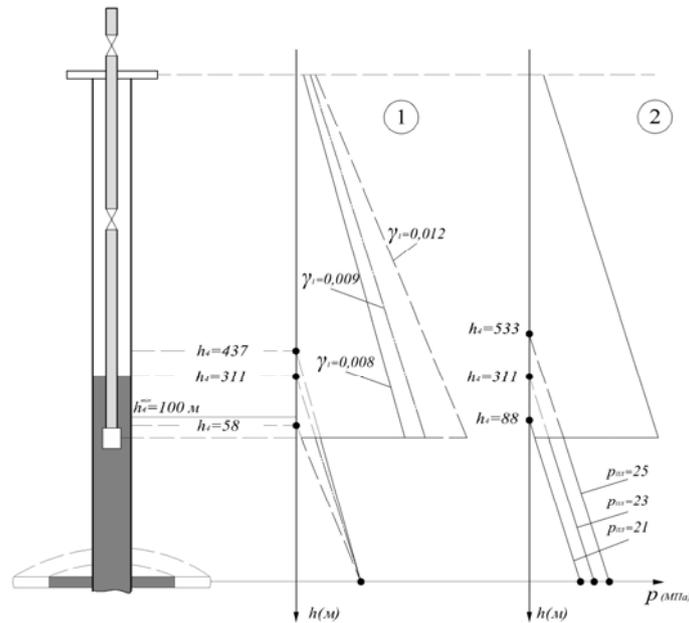


Рис. 3. Графики равновесных состояний системы:

1 — при вариации γ_1 ; 2 — при вариации $p_{пл}$

В крайних точках интервалов отмечаются критические состояния эксплуатации: при $\gamma_1 = 0,012$ имеем $h_4 = 58$ м, $< h_4^{\min} = 100$ м, а при $p_{пл} = 21$ МПа уровень снижается до $h_4 = 88$ м.

Равновесное состояние системы для $u = 1$ в номинальном режиме эксплуатации отражено в табл. 3, где $\Delta p_{\text{НКТ}}$ — потери напора в НКТ.

Таблица 3

Результаты анализа равновесных состояний

u	q (м ³ /сут)	p_z (МПа)	h_{4u1} (м)	p_3 (МПа)	p_5 (МПа)	$r_{\text{НКТ}}$	$w_{\text{ПЛ}}$	$r_{\text{Ш}}$	$\Delta p_{\text{НКТ}}$
1	100	10,5	311	4,2	19,86	0,73	8	2,78	0,66

Для исследования гидродинамических процессов, модель (1) дорабатывается новыми соотношениями [6]

$$\left\{ \begin{array}{l} q(t) = \left(\frac{u(t) \cdot v(t)^2 \cdot \lambda_0(i) - H_N + (p_{4u0} + \gamma_4 \cdot h_4(t) - p_{\text{л}}) / \gamma_1}{u(t) \cdot v(t) \cdot \lambda_0(i) + r_{\text{ш}} + r_{\text{НКТ}} + (1-u) \cdot r_N} \right)_+, \\ p_3(t) = p_{4u0} + \gamma_4 h_4(t), \\ p_z(t) = p_3(t) + \gamma_1 \cdot (H_z - H_N), \\ p_8(t) = p_{\text{л}} + \gamma_1 r_{\text{ш}} \cdot q(t), \\ p_5(t) = p_8(t) + \gamma_1 (H_N + r_{\text{НКТ}} \cdot q(t)), \end{array} \right. \quad (4)$$

с уравнениями притока и оттока в призабойную зону скважины:

$$\begin{aligned} q_z(t) &= w_1 (p_1(t) - p_z(t)), \\ q_1(t) &= w_2 (p_{\text{пл}} - p_1(t)), \end{aligned}$$

и гидродинамикой объемных балансов:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_0 \cdot \frac{dh_4(t)}{dt} = q_z(t) - q(t) \\ \tau_1 \cdot \frac{dp_1(t)}{dt} = q_1(t) - q_z(t) \end{array} \right. , \quad (5)$$

где $\tau_1 = \beta m V_1$ — параметр гидроупругости пустот призабойной зоны, w_1, w_2 — гидропроводности переходов «забой — ПЗ» и «ПЗ — коллектор», коэффициент продуктивности $w_{\text{пл}} = w_1 w_2 / (w_1 + w_2)$ и гидросопротивление пласта $r_{\text{пл}} = 1 / w_{\text{пл}}$.

Разработанная в среде Simulink и представленная блок-схемой рис. 4 программа моделирования системы (4÷5) позволяет исследовать динамику переходных режимов в скважине по основным переменным состояния при пуско-остановочных режимах $u(t) = \{0, 1\}$ и вариации частоты вращения ЭЦН $v(t) \in [0, 7; 1, 3]$.

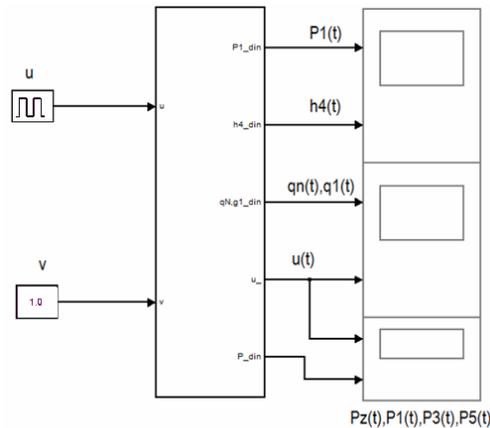


Рис. 4. Модель переходных процессов скважинной системы

Результаты расчета переходных процессов в системе с параметрами $w_2 = 4 \cdot w_1 = 10,2$, $r_{\text{НКТ}} = 0,73$, $r_N = 0,1$, $r_{\text{ш}} = 2,7$ при $\gamma_1 = 0,009$ и $p_{\text{пл}} = 23$ представлены графиками на рис. 5.

Результат анализа показывает, что при $v = 1,12$ система входит в аварийное состояние срыва подачи.

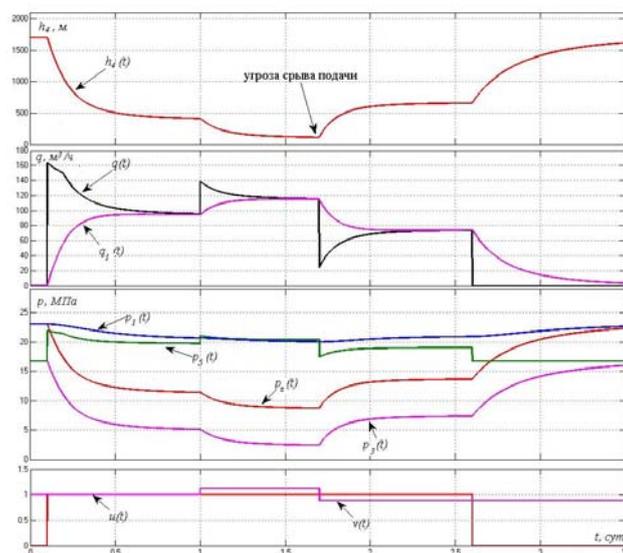


Рис. 5. Переходные процессы в системе

Разработанная в среде Simulink инструментальная среда на основе модели равновесных состояний (1) и гидродинамики (4÷5) позволяет анализировать значения равновесных состояний при изменении условий эксплуатации, давать оценку надежности работы скважины при вариации параметров системы, проводить мониторинг критерия на срыв подачи продукта, а также строить переходные процессы в скважинной системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. М.: Нефть и Газ, 2003. С. 669–675.
2. Ипатов Д.И., Кременецкий М.И. Геофизический и гидродинамический контроль месторождений углеводородов. М.: Ин-т компьютерных технологий, 2006. 780 с.
3. Соловьев И.Г., Говорков Д.А. Идентификация гидродинамических параметров скважины, оборудованной погружным насосом с наблюдателем процесса разгазирования нефти в подъемнике: (Основы методики I) // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2009. № 3. С. 28–33.
4. Соловьев И.Г. Вопросы информации и управления эксплуатаций скважин с погружным электронасосом // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2010. № 8. С. 43–47.
5. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/simulink/book1/index.php>.
6. 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.

A.V. Klishev, I.G. Solov'yev

Analysis of hydrodynamics in a wellbore system with a regulated ESP in the Simulink environment

Subject to creation being a model of a vertical wellbore system in the Simulink environment, allowing to assess the equilibrium states, to investigate hydrodynamics of a well, as well as to analyze critical states, assessing acceptable limits of the parameters' variations.

Model, wellbore system, hydrodynamics, assessment.