

РАСЧЕТ ДИНАМОГРАММ ШТАНГОВОГО НАСОСА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

THE CALCULATION OF THE DYNAMOMETER CARDS OF SUCKER ROD PUMP IN REAL TIME

**A. Malyugin
D. Kazunin**

Summary. a mathematical model of the dynamics of the rods and hydraulic cylinder deep pump installations for training systems real time. The model takes into account the free gas content in the oil at pump intake. The output of the model obtained by the dynamometer card loads at the end of the polished rod. The presented dynamograms corresponding to the regular operation of the pump, as well as working with the complications or malfunctions.

Key words: sucker-rod pump polished rod, the gas, the dynamometer card.

Малюгин Алексей Александрович

Соискатель,

Санкт-Петербургский государственный университет

malugin_alex@mail.ru

Казунин Дмитрий Владимирович

Д.т.н., доцент, главный научный сотрудник,

Санкт-Петербургский государственный университет

Аннотация: предложена математическая модель динамики штанг и гидравлики цилиндра глубинной насосной установки для тренажерной системы реального времени. Модель учитывает содержание свободного газа в нефти на приеме насоса. На выходе модели получается динамограмма нагрузки на конце полированного штока. Представлены расчётные динамограммы, соответствующие штатному режиму работы насоса, а также работе с осложнениями или неисправностями.

Ключевые слова: скважинный штанговый насос, полированный шток, газовое число, динамограмма.

Введение

Активное развитие нефтедобывающей отрасли, усложнение процессов бурения и добычи углеводородов требует качественной подготовки персонала. Это касается и подготовки операторов оборудования освоения скважин. Одним из способов добычи нефти из скважин является использование скважинного штангового насоса (СШН). Особенно актуально их применение для малодобитных скважин. Одним из основных инструментов контроля и диагностирования осложнений в процессе эксплуатации скважины штанговым насосом является динамометрия СШН, которая представляет собой получение диаграммы зависимости нагрузки на полированном штоке от положения его верхнего конца [1, 2, 3, 5].

Одним из направлений подготовки персонала является использование тренажерных систем реального времени, имитирующих рабочую среду для обучаемого. Важнейшей частью тренажерной системы являются математические модели объектов и процессов. Математические модели могут использоваться в средствах обучения операторов или ознакомления с принципами работы установки. В данной статье описывается математическая модель динамики штангового насоса, позволяющая получить динамограммы на штоке в штатном режиме и при появлении осложнений разного типа. Данная модель использована в тренажере эксплуатации и освоения скважин. В работе внимание сосредоточено на математическом моделировании ди-

намики штанг глубинного насоса и гидравлики цилиндра насоса.

На модель, работающую в составе тренажерной системы, налагается ряд специальных требований:

- ◆ Параметры системы могут задаваться в широком диапазоне значений. Колонна штанг может конфигурироваться из различных частей и материалов с разными свойствами. Глубина скважины может достигать нескольких километров.
- ◆ Модель должна имитировать определенный набор эффектов, имеющих место при эксплуатации реального оборудования. Должны воспроизводиться колебательные процессы, связанные с движением колонны с учетом наличия жидкости, ее газовым числом на приеме насоса.
- ◆ Модель может работать как в реальном времени, так и в ускоренном режиме. Причем на одной вычислительной машине класса intel core i5 может запускаться параллельно до 6 моделей для скважин и насосов разной конфигурации.
- ◆ Одним из результатов моделирования должна быть динамограмма полированного штока. Все расчетные величины должны быть адекватными в сравнении с реальными данными.

Важным аспектом обучения является отработка действий во внештатных ситуациях. Поэтому функциональность модели должна включать имитации осложнений и неисправностей: утечки и засорения в всасывающей

и нагнетательной частях, прихват плунжера, низкая посадка плунжера и его заедание в верхней части цилиндра, влияние свободного газа в поступающей в цилиндр жидкости.

На рис. 1 представлена принципиальная схема СШН. Основными частями установки являются система штанг, плунжер, движущийся внутри цилиндра, всасывающий и нагнетательный клапан, насосно-компрессорные трубы (НКТ). Верхний конец штанг приводится в движение станком-качалкой [1, 2].

Исходя из требований к функциональности тренажера, была выбрана модель длинного упругого стержня в скважине. Движение верхнего конца колонны штанг задается через частоту и длину хода полированного штока. Сделаны следующие допущения:

- ◆ Свободный газ, поступающий в объем под плунжером на приеме насоса, далее не растворяется и не выделяется в жидкости.
- ◆ Рассматривается только растяжение колонны штанг, НКТ считаются абсолютно твердыми.
- ◆ Скважина, НКТ и колонны штанг считаются строго вертикальной. Эффекты изгиба НКТ не рассматриваются.
- ◆ Игнорируется трение муфт соединения штанг и других узлов о стенки НКТ, кроме трения плунжера о стенку цилиндра насоса.

Уравнения динамики насоса

Обозначим глобальную декартову систему $OXYZ$, ось OX направлена вверх, ее начало координат находится на пересечении оси скважины и поверхности земли. L_0 — длина трубы в ненагруженном состоянии, ρ — плотность материала, A — площадь сечения, E — коэффициент упругости, γ — коэффициент вязкости материала, D — внутренний диаметр НКТ, ρ_f — плотность жидкости, β — коэффициент сжимаемости жидкости. p_d — нагнетательное давление (давление над плунжером), p_s — всасывающее давление (давление под цилиндром). Неизвестными величинами являются продольная координата сечения x , масса газа m_g жидкости m_f в объеме под плунжером, давление в цилиндре p_c , а также нагрузка в на верхнем конце полированного штока F_{pr} :

$$x = F(s, t), m_g = F_g(t), m_f = F_f(t),$$

где s — естественная координата трубы, $0 \leq s \leq L_0$, $s=0$ соответствует нижнему концу колонны штанг. Обозначим производную по s через $d \cdot / ds = (\cdot)'$.

Уравнения продольных колебаний колонны штанг имеют вид [7]:

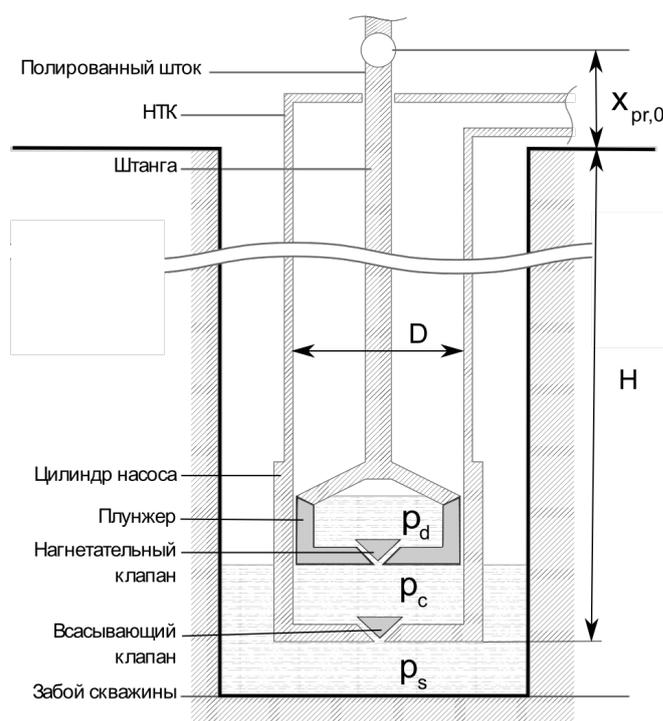


Рис. 1. Схема штангового насоса.

$$\begin{cases} T = EA(x' - 1 + \beta \dot{x}') \\ \rho A \ddot{x} - T' = -(\rho - \rho_f)Ag - \alpha_x \ddot{x}' \end{cases} \quad (1)$$

T — сила натяжения упругой колонны, α_x — коэффициент гидродинамического трения колонны штанг в жидкости. Граничные условия задаются соотношениями:

$$\begin{cases} x(L_0, t) = A_{pr} \sin(2\pi n_{pr} t) \\ T(0, t) = (0.25\pi D^2 - A)(p_d - p_c) + T_{pl}' \end{cases}$$

где n_{pr}, A_{pr} — частота и амплитуда движения верхнего конца полированного штока. Площадь давления над плунжером определяется соотношением $A_c = (0.25\pi D^2 - A)$. $F_L = T(L, t)$ — нагрузка на полированном штоке T_{pl} — сила полужидкого трения плунжера о стенку цилиндра.

В расчёт гидравлики внесена зависимость содержанием газа в цилиндре. Оно определяется газовым числом на приеме насоса R_s при давлении всасывания [6]. По определению $R_s = V_{gs} / V_{fs} \cdot V_{gs}$, V_{fs} — объемы газа и жидкости соответственно в смеси при давлении всасывания. Газовое число в цилиндре может меняться в зависимости от изменения газового числа на приеме. Поступление смеси в цилиндр или истечение из него

возможно с учетом осложнений как через нагнетательную, так и через всасывающую часть.

Следующее уравнение описывает изменения газовой и жидкостной массовой составляющей в цилиндре в зависимости от давлений всасывания и нагнетания. Давление на выходе (нагнетательное давление) складывается из давления столба жидкости над плунжером и давления на выходе из НКТ. Давление внутри цилиндра определяется исходя из условия равенства давлений газовой и жидкостной части в объеме цилиндра:

$$\begin{cases} V_g + V_f = V_c = A_c(H + x_{pl}) \\ p_{fc} = p_{gc} \end{cases} \quad (2)$$

Давления жидкости определяется по формуле $p_{fc} = p_0 - \ln(V_f \rho_{f0} / m_f) / \beta$, для газа — $P_{gc} = Zm_g / V_g$, где Z — некоторая константа [6]. x_{pl} — координата положения плунжера. Изменение масс свободного газа и жидкости в объеме под плунжером определяется соотношениями:

$$\dot{m}_f = \begin{cases} \frac{\rho_{fd} q_{dc}}{1 + R_d}, \text{ при } p_d > p_c \\ \frac{\rho_{fc} q_{dc}}{1 + R_c}, \text{ при } p_d \leq p_c \end{cases} + \begin{cases} \frac{\rho_{fs} q_{sc}}{1 + R_s}, \text{ при } p_s > p_c \\ \frac{\rho_{fc} q_{sc}}{1 + R_c}, \text{ при } p_s \leq p_c \end{cases}, \quad (2)$$

$$\dot{m}_g = \begin{cases} \frac{\rho_{gd} q_{dc} R_d}{1 + R_d}, \text{ при } p_d > p_c \\ \frac{\rho_{gc} q_{dc} R_c}{1 + R_c}, \text{ при } p_d \leq p_c \end{cases} + \begin{cases} \frac{\rho_{gs} q_{sc} R_s}{1 + R_s}, \text{ при } p_s > p_c \\ \frac{\rho_{gc} q_{sc} R_c}{1 + R_c}, \text{ при } p_s \leq p_c \end{cases}, \quad (3)$$

где массовые потоки:

$$q_{dc} = \begin{cases} \varphi_{dc} A_c \sqrt{2(p_d - p_c) / \bar{\rho}_d}, & \text{при } p_d > p_c \\ -\varphi_{cd} A_c \sqrt{2(p_c - p_d) / \bar{\rho}_c}, & \text{при } p_d \leq p_c \end{cases},$$

Аналогичное выражение можно записать для массового потока q_{sc} . Знак шляпки над символом плотности означает среднюю плотность смеси. Газовое число смеси под плунжером определяется следующим образом:

$$R_c = m_g \rho_{fc} / m_f \rho_{gc}$$

Плотности ρ_{fc} , ρ_{gc} вычисляются при давлении p_c . В идеальном случае коэффициенты φ_{dc} , φ_{cs} равны нулю, что соответствует отсутствию утечек.

Выделим основные неисправности, которые можно задать в работе штангового насоса [4, 8]. Утечки во всасывающей или нагнетательной частях насоса создаются заданием ненулевых значений коэффициентов φ_{dc} , φ_{cs} . Засорение соответствующих клапанов уменьшением φ_{cd} , φ_{sc} . Прихват плунжера имитируется с помощью остановки движения нижнего конца колонны штанг. Низкая посадка плунжера и заедание плунжера верхней части цилиндра определяется неправильным соотношением длины штанг и длины НКТ. В качестве основного ослож-

нения в работе используется прокачка жидкости с высоким содержанием свободного газа, степень которого задается газовым числом на приеме насоса R_s .

Численные эксперименты

Пространственная дискретизация уравнений продольных колебаний (1) сделана с помощью МКЭ. Для дискретизации использованы линейные элементы. После дискретизации по времени неявными схемами разных порядков точности и приходим к СЛАУ с ленточной матрицей. Полученная система уравнений решается с использованием LU разложения.

Поиск равновесного давления внутри цилиндра и соответствующих объемов газа и жидкости для нелинейной системы (2) осуществляется методом Ньютона на каждом расчетном шаге. Расчёт гидравлики (масс газа и жидкости внутри цилиндра) проходит явным образом с контролем изменения знака разности давления в цилиндре, давления нагнетания и всасывания в формулах (3), (4).

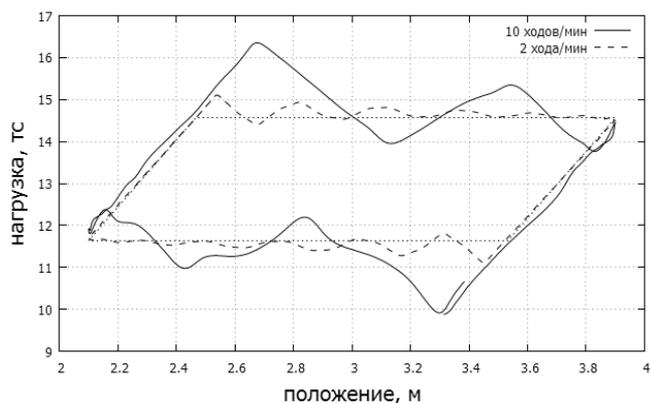


Рис. 2. Динамограмма нормальной работы при разном числе ходов полированного штока.

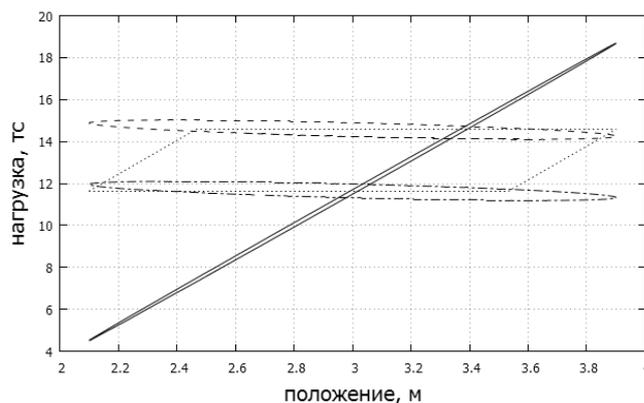


Рис. 3. Динамограмма при неисправностях: прихват плунжера (сплошная линия), выход из строя нагнетательной (штриховая линия) и всасывающей части (штрихпунктирная линия).

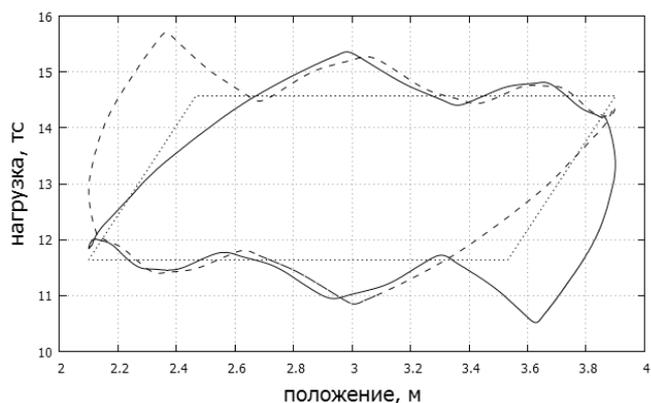


Рис. 4. Динамограмма при осложнениях: утечки в нагнетательной (сплошная линия) и всасывающей (штриховая линия) частях.

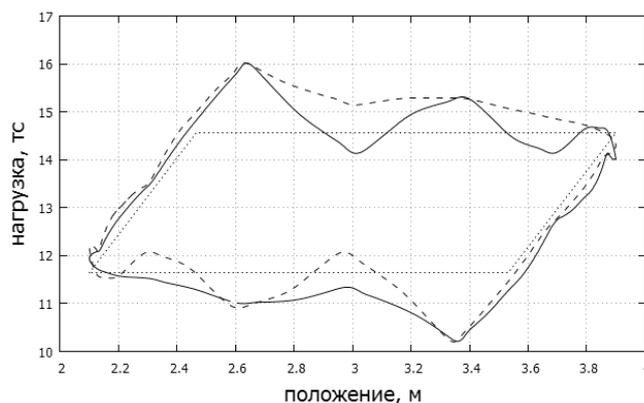


Рис. 5. Динамограмма при осложнениях: засорения нагнетательной (сплошная линия) и всасывающей (штриховая линия) частей.

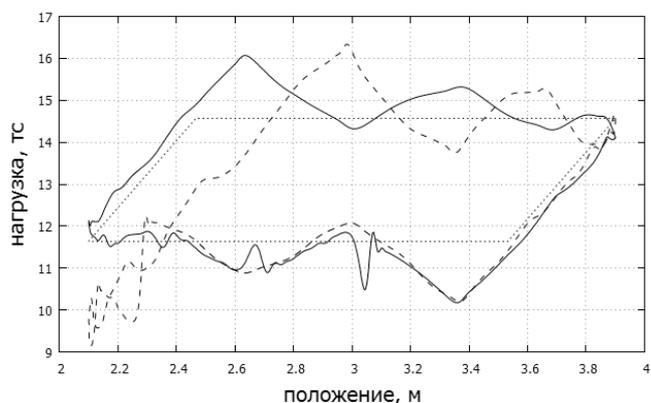


Рис. 6. Динамограмма при осложнениях: заедание плунжера (сплошная линия) и низкая посадка плунжера (штриховая линия).

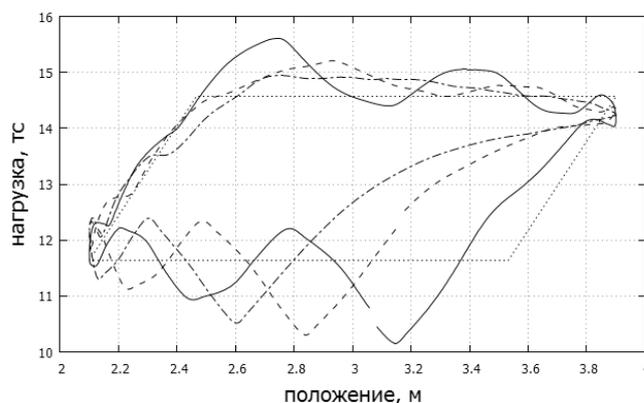


Рис. 7. Влияние свободного газа на динамограмму при разных газовых числах ($R_{s,1} < R_{s,2} < R_{s,3}$) на приеме насоса. $R_{s,1}$ — сплошная линия, $R_{s,2}$ — штриховая линия, $R_{s,3}$ — штрихпунктирная линия.

На рис. 2–7 представлены результаты моделирования для следующих исходных данных. Глубина скважины $H = 2200$ м, $D = 0.05$ м. Штанга состоит из двух частей. Верхняя штанга — $L_1 = 1000$ м, $d_1 = 0.032$ м, нижняя $L_2 = 1200$ м, $d_2 = 0.029$ м. Нагнетательное давление $p_d = 176$ бар, давление всасывания $p_s = 30$ бар.

Пунктирной линией обозначена теоретическая динамограмма, соответствующей вышеуказанным данным. На рис. 2 представлены динамограммы штатной работы насоса при разном числе ходов полированного штока. Диаграммы на рис. 3–4 получены для 5 ходов полированного штока.

Заключение

В ходе моделирования динамики штангового насоса получена вычислительная модель, удовлетворяющая требованиям к ресурсам и функциональности тренажерной системы. Поведение модели соответствует реальным данным достаточно точно для целей обучения. Проведение расчета позволяет проводить имитационную динамометрию насоса. Оно дает возможность обучаемым ознакомиться с работой оборудования, научиться распознавать тип неисправности, которые задаются инструктором тренажерной системы, по качественному виду динамограммы, использовать динамограмму для оценочных расчетов производительности скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мищенко И. Т. Скважинная добычи нефти. М.: Нефть и газ, 2003. 816 с.
2. Щуров И. В. Технология и техника добычи нефти. М.: Недра, 1983, 510 с.
3. Ивановский В.Н., Дарищев В. И., Сабиров А. А., Каштанов В. С., Пекин С. С. Скважинные насосные установки для добычи нефти. М.: Нефть и газ, 2002. 824 с.
4. Ковшов В. Д., Сидоров М. Е., Светлакова С. В. Моделирование динамограммы станка-качалки. Утечки в клапанах // Нефтегазовое дело. 2005, Т. 3, с. 47–54.
5. Ковшов В. Д., Сидоров М. Е., Светлакова С. В. Моделирование динамограммы станка-качалки. Нормальная работа насоса // Нефтегазовое дело. 2004, Т. 2, с. 75–81.
6. Лekomцев А. В. Оценка глубины подвески штанговых глубинных насосов в скважинах Уньвинского месторождения // Вестник ПНИПУ = State National Research Polytechnical University of Perm. Geology. Oil and Gas Engineering and Mining. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2011. — № 1. — С. 85–93.
7. Топольников А. С. Моделирование динамических нагрузок на полированный шток станка-качалки при неисправностях в работе штангового насоса // Труды Института механики им. Р. Р. Мавлютова УНЦ РАН. — 2014. — № 10. — С. 95–101.
8. В. Б. Садов. Моделирование динамограмм с различными дефектами оборудования нефтяной скважины // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». — 2013. — Т. 13. — № 1. — С. 16–25.

© Малюгин Алексей Александрович (malugin_alex@mail.ru), Казунин Дмитрий Владимирович.
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

