

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМОГРАММ С РАЗЛИЧНЫМИ ДЕФЕКТАМИ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ

*В.Б. Садов*

## SIMULATION OF DYNAMOMETER CARDS WITH VARIOUS DEFECTS OF OIL WELL EQUIPMENT

*V.B. Sadov*

Рассматривается задача моделирования динамограммы в системе оборудование скважины – станок-качалка. Приведены основные формулы моделирования для различных дефектов скважины и оборудования и результаты моделирования.

*Ключевые слова:* динамограмма, моделирование.

In the article the task of simulation of the dynamometer cards in the system of oil well equipment - beam pumping unit is considered. The basic formulas of simulation for various defects of oil well and equipment and the results of simulation are presented.

*Keywords:* dynamometer card, simulation.

### Введение

При синтезе алгоритмов диагностики состояния скважины и добывающего оборудования по динамограмме (график зависимости усилия на полированном штоке от его перемещения) возникает одна специфическая проблема: виды динамограмм даже при одном виде дефектов сильно отличаются друг от друга. Поэтому накопление информации по динамограммам может занимать очень длительное время. Например, в [1] описан алгоритм определения параметров скважин. При этом для достижения достоверности классификации динамограммы с точностью 70 % и более количество обработанных динамограмм превышало 1200 (в эксперименте было задействовано 483 насосные установки). Поэтому отладка алгоритмов диагностики требует либо наличие базы данных по динамограммам, полученным с различных скважин, либо наличие модели, с помощью которой можно получить варианты динамограмм с разными дефектами. Для получения же модели необходимо в первую очередь определить виды дефектов скважины, диагностируемых по устьевым динамограммам.

### Виды динамограмм

Типовая (нормальная) динамограмма приведена на рис. 1 [2, с. 650].

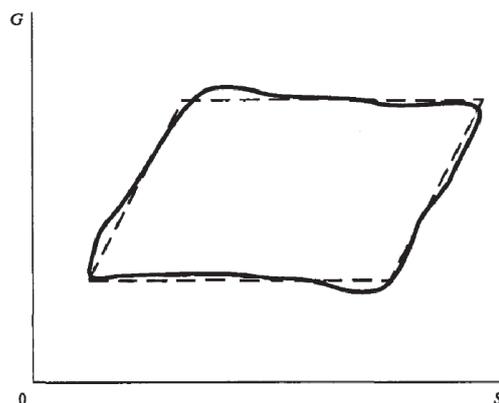


Рис. 1. Типовая динамограмма

В ходе съема динамограммы могут получаться разные ее формы, которые говорят о различных неисправностях насоса, колонны штанг, скважины и неправильно выбранных режимах работы оборудования. Типовые формы динамограмм приведены на рис. 2–8 [2, с. 649–654].

Рис. 5 и 6 характеризуют влияние свободного газа на работу насоса. Причем линии 1, 2, 3 на рис. 6 расположены в порядке уменьшения давления, линия 4 – срыв подачи насосом.

Рис. 7 и 8 характеризуют неправильную установку штока привода глубинного штангового насоса.

Садов Виктор Борисович – канд. техн. наук, доцент кафедры систем управления, Южно-Уральский государственный университет; sv\_2005@inbox.ru

Sadov Viktor Borisovich – Candidate of Science (Technical), Associate Professor of Control System Department of South Ural State University; sv\_2005@inbox.ru

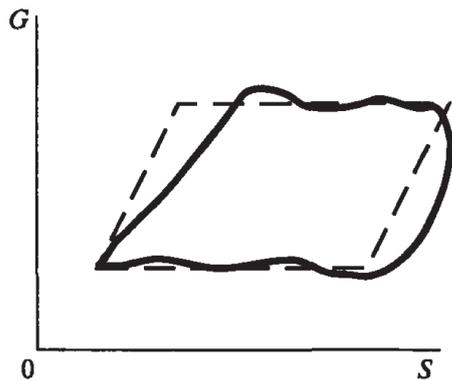


Рис. 2. Утечка в нагнетательной части насоса

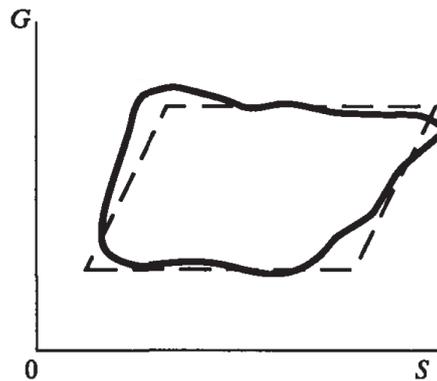


Рис. 3. Утечка в приемной части насоса

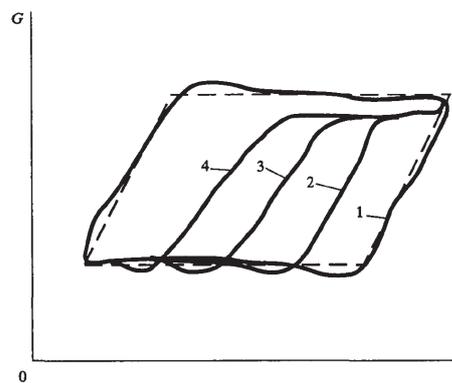


Рис. 4. Подача насоса превышает приток продукции в скважину (2–4, 1 – норма)

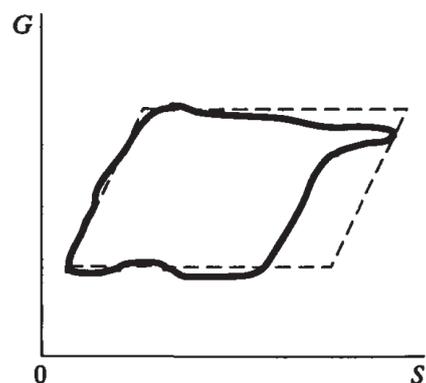


Рис. 5. Большое давление газа у приема насоса

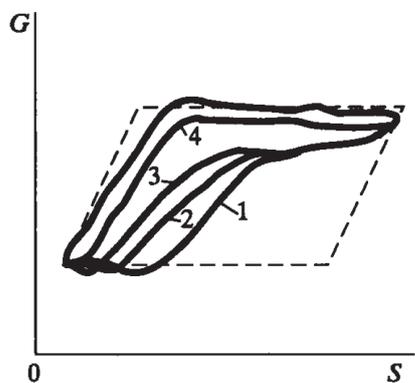


Рис. 6. Небольшие давления газа у приема насоса

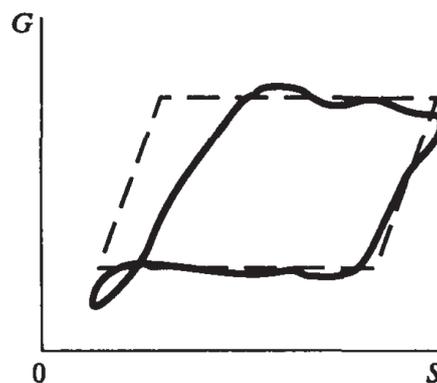


Рис. 7. Удар плунжера о всасывающий клапан

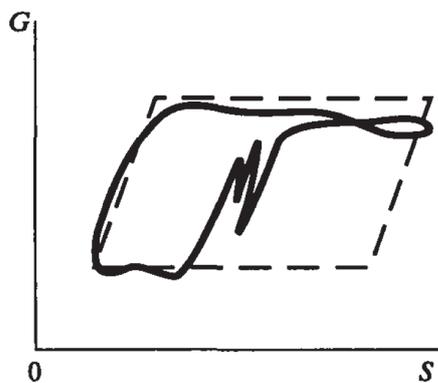


Рис. 8. Высокая посадка плунжера и срыв нижнего конуса захватным штоком

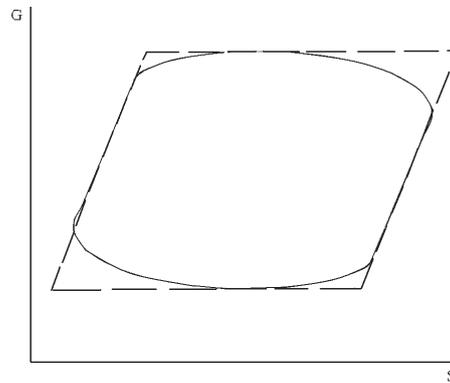


Рис. 9. «Запарафинивание» скважины

Рис. 9 характеризует случай «запарафинивания» скважины, когда резко увеличивается трение колонны штанг в жидкости скважины.

Можно также выделить случай обрыва колонны штанг. Динамограмма при этом похожа на случай «запарафинивания» скважины, но разница между максимальным и минимальным значениями усилия на штоке очень мала.

На рисунках пунктиром показана идеальная динамограмма.

Рис. 4, 5 и 6 по своей форме очень близки, поэтому будем рассматривать только следующие формы неисправности оборудования скважины:

1. Заедание плунжера глубинного насоса вверх.
2. Заедание плунжера глубинного насоса вниз.
3. Неверная установка глубинного штангового насоса – выход плунжера из корпуса насоса вверх.
4. «Запарафинивание» скважины.
5. Утечка в нагнетательной части насоса.
6. Утечка в приемной части насоса.
7. Подача насоса превышает приток продукции в скважину.
8. Обрыв колонны штанг.

#### Моделирование динамограммы

Схема скважинной насосной установки при использовании в качестве насоса традиционного станка-качалки приведена на рис. 10 [2].

Общий вид насоса приведен на рис. 11.

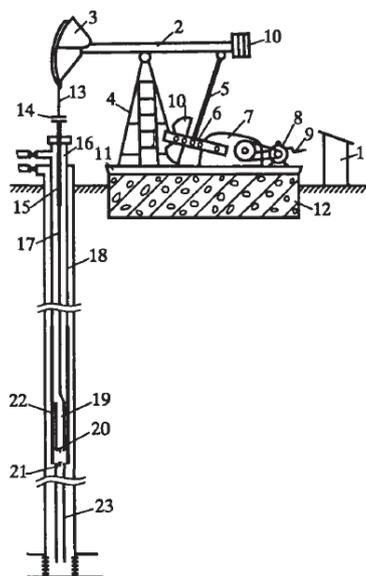


Рис. 10. Принципиальная схема СШНУ: 1 – станция управления, 2 – балансир, 3 – головка балансира, 4 – стойка балансира, 5 – шатун, 6 – кривошип, 7 – редуктор, 8 – приводной двигатель, 9 – тормоз, 10 – противовесы, 11 – металлическая рама, 12 – бетонный фундамент, 13 – канатная подвеска, 14 – траверсы, 15 – полированный шток, 16 – устьевая арматура, 17 – колонна штанг, 18 – колонна НКТ, 19 – плунжер насоса, 20 – нагнетательный клапан, 21 – всасывающий клапан, 22 – цилиндр насоса, 23 – хвостовик

Ставится задача вычисления нагрузки на полированном штоке. Закон движения полированного штока имеет вид

$$U(t) = \frac{1}{2}L \left( 1 + \sin \frac{2\pi t}{T} \right), \quad (1)$$

где  $L$  – длина хода штока;  $T$  – период качаний;  $t$  – текущее время.

Известны также характеристики оборудования скважины.

Вычисляются попутно закон движения на плунжере глубинного штангового насоса, нагрузка на плунжере.

Вносимые зависимости:

- 1) ограничение хода плунжера при движении вниз (например, при неверной установке глубинного штангового насоса);
- 2) изменение нагрузки на плунжере при движении вверх (например, при выходе плунжера из внешнего цилиндра насоса при неправильной установке глубинного штангового насоса);
- 3) изменение нагрузки при движении вверх и вниз (например, при заедании плунжера, влияние попутного газа и пр.).

При движении плунжера вверх нагнетающий клапан закрыт, всасывающий клапан открыт и жидкость из скважины заполняет пространство под плунжером объемом всасывания, равным произведению площади цилиндра на ход плунжера. При этом происходит слив жидкости из области над плунжером объемом слива при движении

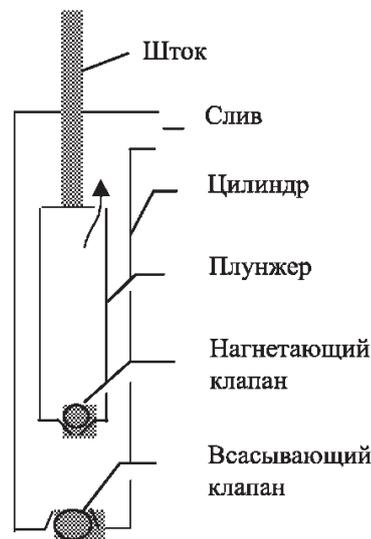


Рис. 11. Общий вид глубинного штангового насоса

штока вверх, равным разности произведения площади цилиндра на ход плунжера и площади штока на ход штока, поскольку часть штока выходит из цилиндра, освобождая тем самым часть объема над плунжером.

При движении плунжера вниз нагнетающий клапан открыт, а всасывающий клапан закрыт и жидкость из области под плунжером заполняет пространство над плунжером объемом нагнетания, равным произведению площади цилиндра на ход штока. При этом происходит слив жидкости из области над плунжером объемом слива при движении штока вниз, равным произведению площади штока на ход штока, поскольку часть штока входит в цилиндр, занимая тем самым часть объема над плунжером. Таким образом, при нормальной работе насоса объем нагнетания равен объему всасывания и равен сумме объема слива при движении штока вверх и объема слива при движении штока вниз.

Данную систему можно рассматривать, анализируя баланс сил на плунжере глубинного штангового насоса и на полированном штоке [3].

При нормальной работе насоса усилие, действующее на плунжер, можно определить как [4]

$$P_1 = P_{тр} + P_{ж} + P_c, \quad (2)$$

где  $P_{тр}$  – сила трения скольжения по закону Кулона, принимается постоянной  $P_{тр1}$  при движении плунжера вверх ( $V_1 > 0$ ) и  $P_{тр2}$  при движении плунжера вниз ( $V_1 < 0$ );  $P_{ж}$  – жидкостная нагрузка, действующая на плунжер от столба жидкости в насосных и обсадных трубах и от устьевого и затрубного давления газа;  $P_c = \beta V_1$  – сила сопротивления, пропорциональная скорости,  $\beta = 2bM$ , где  $M$  – масса штанг,  $b$  – константа вязкостного трения.

Жидкостная нагрузка при движении плунжера вверх ( $V_1 > 0$ ) определяется как

$$P_{ж1} = (Hg\rho_{ж} + P_y - P_3)F_{пл}, \quad (3)$$

где  $H$  – длина штанги (глубина погружения насоса);  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости;  $P_y$  – устьевое давление газа;  $P_3$  – давление газа в затрубном пространстве;  $F_{пл}$  – площадь плунжера насоса.

При движении вниз ( $V_1 < 0$ )  $P_{ж2} = 0$ . При этом при движении вверх (попытке движения вверх) скорость  $V_1$  будет равна нулю, если усилие на плунжере  $P_1$  не превысит величины  $P_{ж1} + P_{тр1}$ . При попытке движения вниз скорость  $V_1$  будет равна нулю, если усилие на плунжере  $P_1$  не превысит величины  $P_{тр2}$ .

Следует заметить, что поскольку инерционными свойствами плунжера из-за их малости можно пренебречь, то направление скорости движения плунжера  $V_1$  однозначно определяется знаком усилия на нем  $P_1$ .

Усилие, действующее на шток, можно определить как

$$P = P_1 + P_{ин} + P_{штж}, \quad (4)$$

где  $P_{ин}$  – силы инерции штанг,  $P_{ин} = -M(V_1 - V)'$ ,  $M$  – масса колонны штанг,  $(V_1 - V)' = V_1' - V'$  – ускорение;  $P_{штж}$  – сила тяжести колонны штанг в жидкости,  $P_{штж} = gM_{штж}$ ,  $M_{штж}$  – масса колонны штанг в жидкости.

При этом нагрузка, скорость и перемещение на плунжере выражаются через нагрузку, скорость и перемещение на полированном штоке как

$$\begin{aligned} P_1(t) &= 0,5[P(t+\delta) + P(t-\delta)] - Q - \\ &- 0,5[V(t+\delta) - V(t-\delta)]\frac{Ef}{a}; \\ V_1(t) &= 0,5[V(t+\delta) + V(t-\delta)] - \\ &- 0,5[P(t+\delta) - P(t-\delta)]\frac{a}{Ef}; \\ U_1(t) &= 0,5[U(t+\delta) + U(t-\delta)] - \\ &- 0,5\left[\int_0^t P(t+\delta)dt - \int_0^t P(t-\delta)dt\right]\frac{a}{Ef}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $t$  – переменная времени;  $\delta = \frac{H}{a}$  – время распространения волны перемещений от одного конца штанги до другого ( $a$  – скорость звука в штанге);  $f$  – площадь сечения штанги;  $E$  – модуль упругости материала штанги;  $Q$  – вес штанг в жидкости (в нефти).

Обратные уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} P(t) &= 0,5[P_1(t+\delta) + P_1(t-\delta)] + Q + \\ &+ 0,5[V_1(t+\delta) - V_1(t-\delta)]\frac{Ef}{a}; \\ V(t) &= 0,5[V_1(t+\delta) + V_1(t-\delta)] + \\ &+ 0,5[P_1(t+\delta) - P_1(t-\delta)]\frac{a}{Ef}; \\ U(t) &= 0,5[U_1(t+\delta) + U_1(t-\delta)] + \\ &+ 0,5\left[\int_0^t P_1(t+\delta)dt - \int_0^t P_1(t-\delta)dt\right]\frac{a}{Ef}. \end{aligned} \quad (6)$$

Попытка использования при численном решении разностных уравнений (5) с постоянным шагом показала, что решение его неустойчиво, так как происходят постоянные скачки с одного частного решения на другое. Поэтому предлагается модифицировать формулы (5).

Из первых двух уравнений (5) можно получить:

$$\begin{aligned} P_1(t-\delta) &= 0,5[P(t)+P(t-2\cdot\delta)]-Q- \\ &- 0,5[V(t)-V(t-2\delta)]\frac{Ef}{a}; \\ V_1(t-\delta) &= 0,5[V(t)+V(t-2\delta)]- \\ &- 0,5[P(t)-P(t-2\delta)]\frac{a}{Ef}. \end{aligned} \quad (7)$$

Отсюда, вынеся в левую часть  $P_1(t)$  в обоих уравнениях, имеем:

$$\begin{aligned} P(t) &= [V(t)-V(t-2\delta)]\frac{Ef}{a}- \\ &- P(t-2\delta)+2P_1(t-\delta)+2Q; \\ P(t) &= [V(t)+V(t-2\delta)]\frac{Ef}{a}+ \\ &+ P(t-2\delta)-2V_1(t-\delta)\frac{Ef}{a}. \end{aligned} \quad (8)$$

Сложив оба уравнения и поделив обе части получившегося уравнения на 2, имеем:

$$P(t) = P_1(t-\delta) + Q + [V(t) - V_1(t-\delta)]\frac{Ef}{a}. \quad (9)$$

Усилие, действующее на плунжер, определяется по закону Гука как

$$P_1 = \frac{\Delta LEf}{H}, \quad (10)$$

где  $\Delta L$  – удлинение колонны штанг от действия внешней нагрузки.

Постоянными при решении задачи вычисления динамограммы при известном законе движения полированного штока (1) являются:

- количество ходов полированного штока в минуту (определяет период качаний  $T$ );
- длина хода полированного штока  $L$ ;
- длина колонны штанг  $H$ ;
- масса колонны штанг  $M$ ;
- устьевое давление  $P_y$ ;
- давление в затрубном пространстве  $P_3$ ;
- константа вязкостного трения  $b$  (принимается равной 0,2 ед./с);
- плотность жидкости  $\rho_{жс}$  принимаем равной 0,8 г/мл;
- эффективное сечение штанги  $f$  принимаем равной 5 см<sup>2</sup> (средняя штанга диаметром примерно 25 мм);
- площадь плунжера насоса  $F_{пл}$  принимаем равной 15,55 см<sup>2</sup> (диаметр плунжера примерно 44,5 мм);
- модуль упругости материала штанги (сталь)  $E$  принимаем равным  $2 \cdot 10^5$  МПа;
- плотность материала штанги (сталь) принимаем равной 5,3 г/см<sup>3</sup>;
- скорость звука в штанге  $a$  принимаем равным 4900 м/с (двухступенчатая штанга);
- ускорение свободного падения 9,807 м/с<sup>2</sup>.

### Алгоритм моделирования динамограмм

Исходя из того, что решается разностное уравнение, шаг решения  $\Delta t$  принимаем кратным, но значительно меньшим величины  $\delta$ , т. е.  $\Delta t = \delta / k$ ;  $k \gg 1$ .

Алгоритм решения задачи будет следующим [5].

1. Принимаем нагрузку на штоке в моменты времени  $[-2\delta; -\Delta t]$   $P = Q$ ; перемещение на плунжере  $U_1 = 0$ ; скорость на плунжере  $V_1 = 0$ ; нагрузку на плунжере  $P_1 = 0$ .

2. Начинаем решение при значении времени  $t = 0$ .

3. Меняем значение перемещения на плунжере  $U_1(t) = U_1(t-\Delta t) + V_1(t-\Delta t)\Delta t$ .

4. Вычисляем  $P_1(t)$  по (10).

5. Из решения уравнения (2) получаем значение  $V_1(t) = (P_1 - P_{тр} - P_{ж}) / (2bM)$ .

6. На шаге решения получаем  $P(t)$  согласно (9), где величина  $P_1(t-\delta)$  является известной, а

$V(t)$  вычисляется по (1):  $V(t) = U'(t) = \frac{\pi}{T} L \cos \frac{2\pi t}{T}$ .

При этом значения при времени, меньше нуля, принимаются нулевыми.

7. Увеличиваем значение времени  $t = t + \Delta t$ .

8. Переходим на шаг 3.

*Примечание.* Согласно формулам для реализации процесса вычислений на каждом шаге алгоритма запоминаются значения  $P, P_1, V_1, U_1$ .

### Моделирование дефектов работы насоса и привода

Известны статьи по моделированию отдельных видов дефектов насоса и привода, например [6]. Здесь анализируются причины появления тех или иных дефектов. Формулы, описанные в [6] только для одного дефекта (утечки в клапанах) очень сложны для реализации. Нам же для отладки алгоритмов выделения дефектов по динамограммам совершенно необязательно в точности соблюдать в формулах физику процессов, происходящих в скважине. Достаточно просто обеспечить форму динамограммы, близкую к заданной, при возможности получения динамограмм с отличающимися значениями параметров глубинного оборудования, имитируя работу оборудования на разных скважинах.

Рассмотрим моделирование выделенных дефектов.

1. Заедание плунжера сверху.

При этом дефекте насоса при достижении какого-то конкретного значения перемещения  $U_{п}$  при ходе вверх плунжер упирается в преграду. В нашем случае это будет обозначать то, что при попытке движения вверх в дальнейшем скорость движения плунжера будет равна нулю. При мо-

делировании будет меняться только п. 5 алгоритма:

$$V_1(t) = \begin{cases} 0, (P_1 > 0) \wedge (U_1 > U_n); \\ (P_1 - P_{тр} - P_{ж}) / (2bM) \text{ в остальных} \\ \text{случаях при } P_1 > 0. \end{cases}$$

2. Заедание плунжера вниз.

К этому же случаю сводится неправильная установка насоса, когда при движении плунжер упирается в дно глубинного насоса.

При этом дефекте насоса при достижении какого-то конкретного значения перемещения  $U_n$  при ходе вниз плунжер упирается в преграду. В нашем случае это будет обозначать то, что при попытке движения вниз в дальнейшем скорость движения плунжера будет равна нулю. При моделировании будет меняться только п.5 алгоритма:

$$V_1(t) = \begin{cases} 0, (P_1 < 0) \wedge (U_1 < U_n); \\ (P_1 - P_{тр} - P_{ж}) / (2bM) \text{ в остальных} \\ \text{случаях при } P_1 < 0. \end{cases}$$

3. Неверная установка глубинного штангового насоса – выход плунжера из корпуса насоса вверх.

При этом дефекте при достижении какого-либо конкретного значения перемещения  $U_v$  в ходе движения вверх пропадают составляющие  $P_{тр}$  и  $P_{ж}$  из (2). При моделировании п. 5 алгоритма будет выглядеть, как

$$V_1(t) = \begin{cases} P_1 / (2bM), (P_1 > 0) \wedge (U_1 > U_v); \\ (P_1 - P_{тр} - P_{ж}) / (2bM) \text{ в остальных} \\ \text{случаях при } P_1 > 0. \end{cases}$$

4. «Запарафинивание» скважины.

При этом возрастает вязкостное трение и, возможно, сила трения скольжения. То есть формулы для моделирования не изменяются относительно нормальной работы насоса, только резко возрастает коэффициент вязкостного трения  $b$  при вычислении скорости согласно п.5 алгоритма.

5. Утечка в нагнетательной части насоса.

Эти утечки приводят к более медленному нарастанию нагрузки при движении полированного штока вверх и более быстрому спаданию нагрузки при движении полированного штока вниз [3]. Более подробный анализ процессов приведен в [3]. Нам достаточно будет при моделировании данного дефекта уменьшить скорость движения плунжера глубинного насоса при движении его вверх в  $n$  раз, где назовем  $n$  коэффициентом изменения скорости ( $n$  меняется от 1 до максимального значения). Данный дефект учитывается в п. 5 алгоритма при вычислении значения скорости на плунжере.

6. Утечка в приемной части насоса.

Эти утечки приводят к более быстрому нарастанию нагрузки при движении полированного штока вверх и более медленному спаданию нагрузки при движении полированного штока вниз [6]. Более

подробный анализ процессов приведен в [6]. Нам достаточно будет при моделировании данного дефекта уменьшить скорость движения плунжера глубинного насоса при движении его вниз в  $n$  раз, где назовем  $n$  коэффициентом изменения скорости ( $n$  меняется от 1 до максимального значения). Данный дефект учитывается в п. 5 алгоритма при вычислении значения скорости на плунжере.

7. Подача насоса превышает приток продукции в скважину.

В данном случае в начале движения полированного штока вниз до определенного значения перемещения штока глубинного насоса – конечная точка петли  $U_3$  (меняется от 0 до максимального значения – хода штока глубинного насоса) слабо меняется нагрузка на полированный шток. При дальнейшем движении полированного штока вниз нагрузка на полированный шток изменяется обычным образом. Данный дефект учитывается в п. 5 алгоритма при вычислении скорости движения плунжера глубинного насоса как

$$V_1(t) = \begin{cases} V(t), (V(t) < 0) \wedge (U_1 > U_3); \\ (P_1 - P_{тр} - P_{ж}) / (2bM), \text{ в остальных} \\ \text{случаях при } P_1 > 0; \\ (P_1 + P_{тр}) / (2bM), \text{ в остальных} \\ \text{случаях при } P_1 < 0. \end{cases}$$

8. Обрыв колонны штанг.

Этот дефект приводит к тому, что на плунжере пропадает жидкостная нагрузка и, возможно, уменьшаются составляющие трения. При моделировании данного дефекта из (2) исключается составляющая  $P_{ж}$ . П. 5 алгоритма будет выглядеть как

$$V_1(t) = \begin{cases} (P_1 - P_{тр}) / (2bM), P_1 > 0; \\ (P_1 + P_{тр}) / (2bM), P_1 < 0. \end{cases}$$

*Примечание.* Формулы для моделирования дефектов утечек нефизичны, то есть не отражают действительные процессы при нефтедобыче, но дают при моделировании вид динамограммы, близкий к требуемому. Формулы для моделирования дефекта «подача насоса превышает приток продукции в скважину» являются приближенными, так как не учитывают скорости распространения звука в материале штанг, но также при моделировании дают близкие к действительным результаты.

Автором была разработана программа, реализующая описанный алгоритм моделирования дефектов скважинного оборудования. На рис. 12–17 показаны результаты моделирования некоторых видов дефектов динамограмм.

### **Вывод**

Приведенный подход к моделированию дефектов динамограммы и алгоритмы моделирования позволяют отлаживать методы определения дефектов скважины по динамограмме с помощью

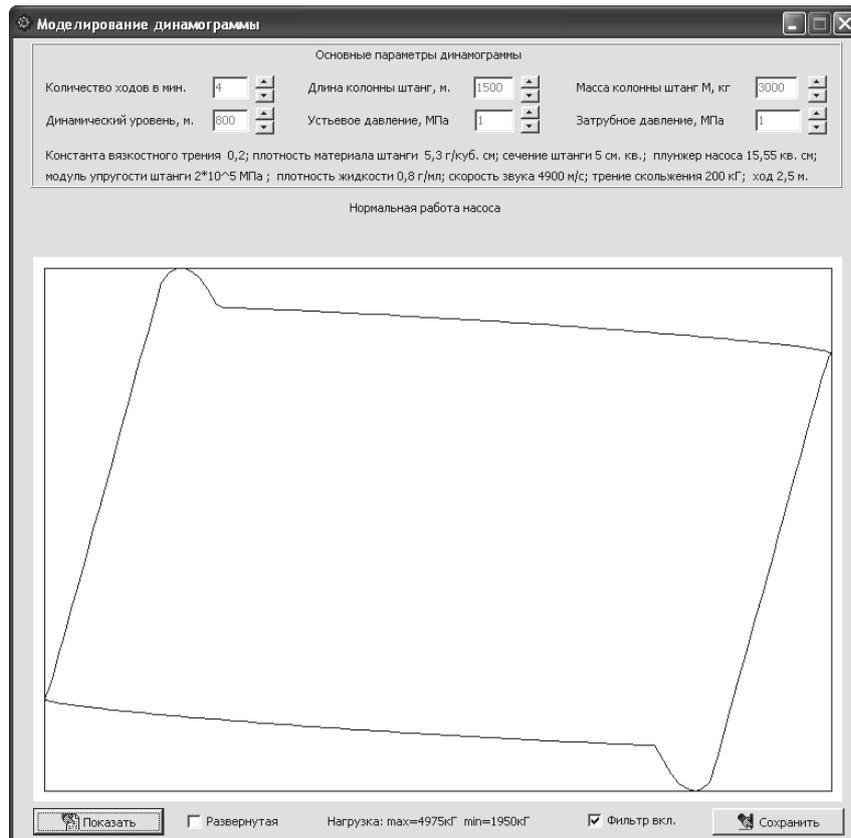


Рис. 12. Нормальная динамограмма

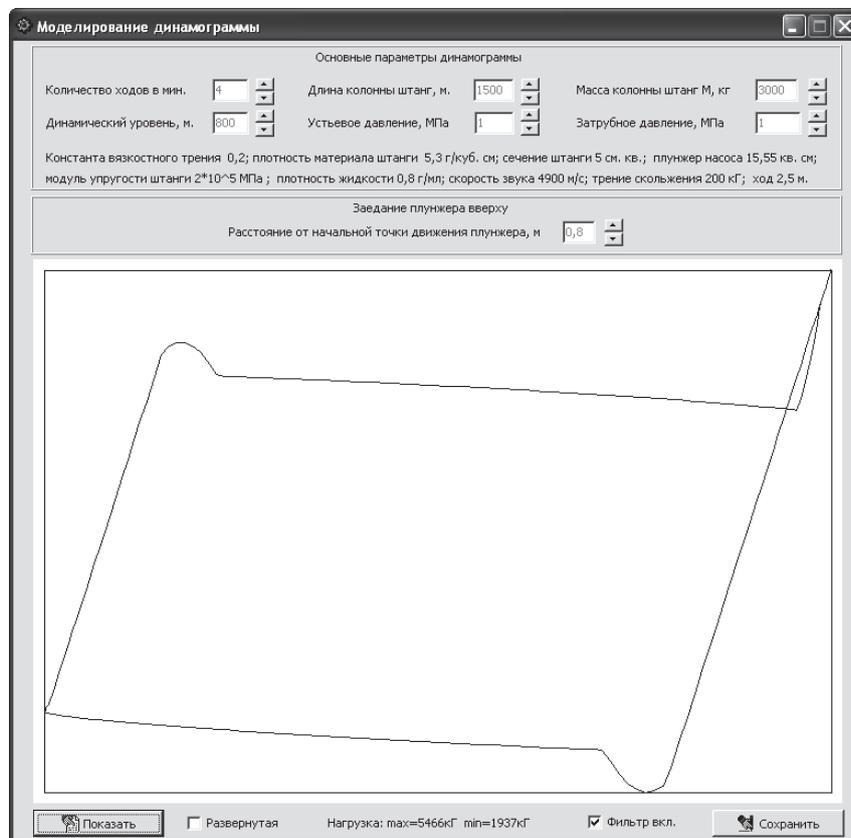


Рис. 13. Задание плунжера вверх

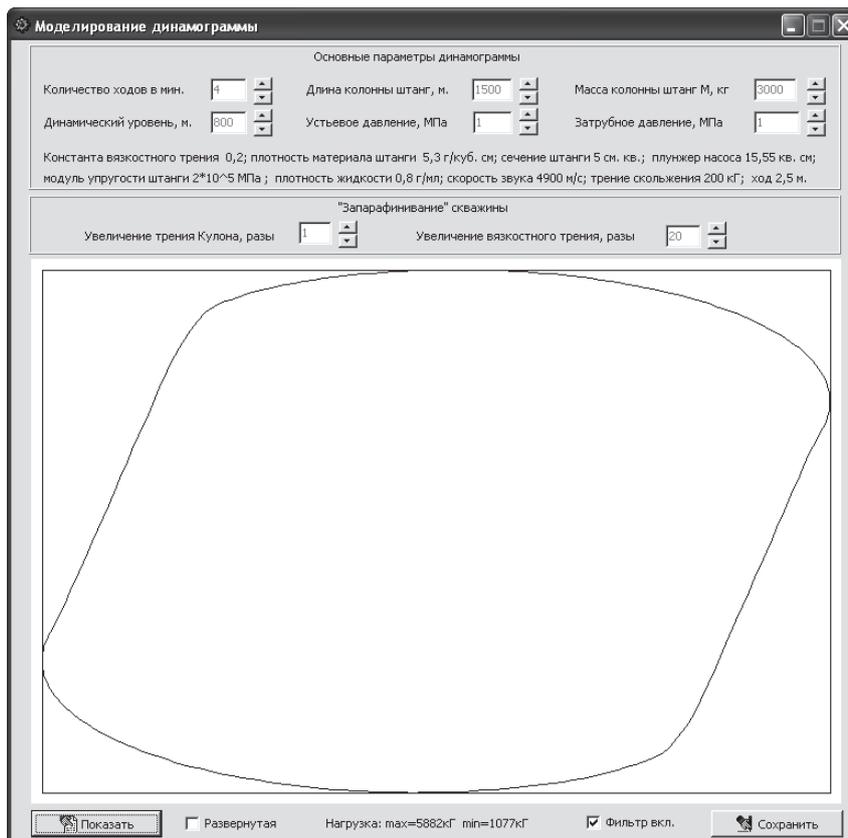


Рис. 14. «Запарафинивание» скважины

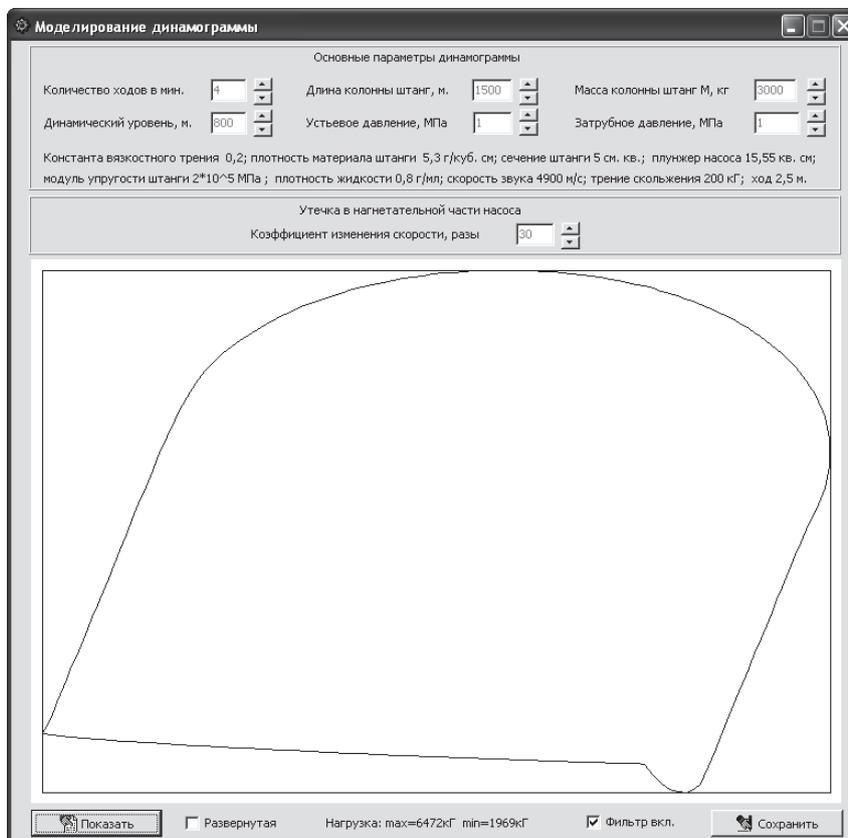


Рис. 15. Утечка в нагнетательной части насоса

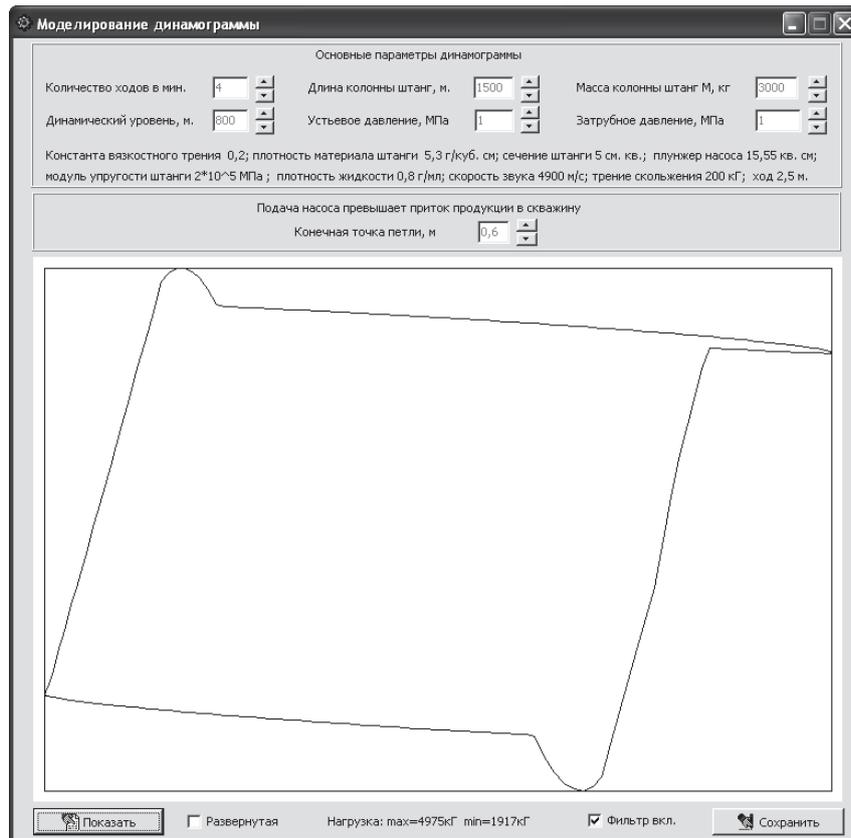


Рис. 16. Подача насоса превышает приток жидкости в скважину

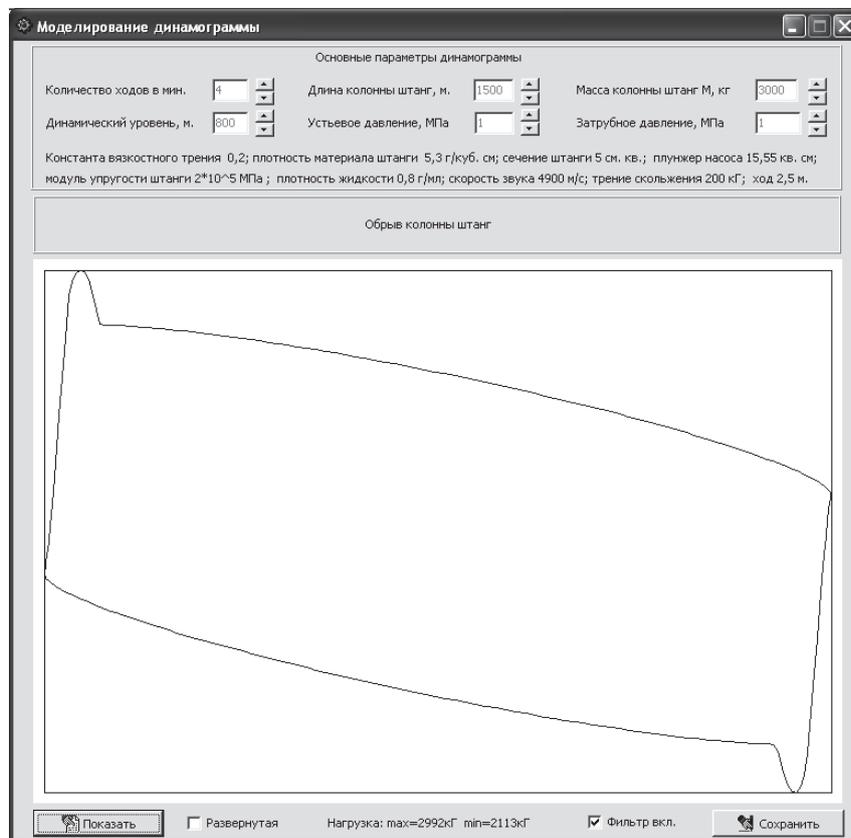


Рис. 17. Обрыв колонны штанг

математических моделей, чем сильно сокращают сроки отладки этих методов. Для окончательной проверки полученных методов будет достаточно проверить их на небольшом числе практических динамограмм.

**Литература**

1. Тагирова, К.Ф. Автоматизация управления технологическим процессом добычи нефти из малобитных скважин на основе динамических моделей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / К.Ф. Тагирова. – Уфа, 2008. – 32 с.

2. Мищенко, И.Т. Скважинная добыча нефти: учеб. пособие для вузов / И.Т. Мищенко. – М.: ФГУП «Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 816 с.

3. Касьянов, В.М. Аналитический метод контроля работы глубинных штанговых насосов / В.М. Касьянов. – М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 1973. – 95 с.

4. Ковшов, В.Д. Моделирование динамограммы станка-качалки. Нормальная работа насоса / В.Д. Ковшов, М.Е. Сидоров, С.В. Светлакова // Нефтегазовое дело. – 2004. – Т. 2. – С. 75–81.

5. Садов, В.Б. Моделирование динамограмм при добыче нефти глубинными штанговыми насосами / В.Б. Садов // Информационно-измерительные и управляющие системы и устройства: сб. тр. приборостроит. фак. – 2011. – С. 172–177.

6. Ковшов, В.Д. Моделирование динамограммы станка-качалки. Утечки в клапанах / В.Д. Ковшов, М.Е. Сидоров, С.В. Светлакова // Нефтегазовое дело. – 2005. – Т. 3. – С. 47–54.

**Поступила в редакцию 3 ноября 2012 г.**