

УДК 622.276: 519.688

Аб.Г. РЗАЕВ, А.Б. ГАСАНОВ, Г.А. ГУЛУЕВ, Ас.Г. РЗАЕВ, Ф.Г. ПАШАЕВ,
М.Г. РЕЗВАН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛУНЖЕРНОЙ ДИНАМОГРАММЫ ПО ДАННЫМ УСТЬЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Предложена новая методика определения значений основных параметров для построения плунжерной динамограммы по данным наземных измерений. Разработан новый вариант решения дифференциального уравнения продольных колебаний штанги глубинного насоса с использованием интегрального преобразования Лапласа. Приведен пример, подтверждающий качество и надежность полученного алгоритма.

Ключевые слова: колебание, глубинный насос, дифференциальное уравнение, динамограмма, нагрузка, перемещение, преобразование Лапласа, трение

1. Введение. В настоящее время широко распространено исследование динамограммы штанги, как способ контроля и прогноза режима работы и технического состояния глубинно-насосной (ГН) установки нефтяных скважин [1, стр.16-25; 2, стр.32-37]. При относительно небольших глубинах и числе качаний, динамограмма, имеющая в этом случае форму, близкую к параллелограмму, позволяет с достаточной точностью судить о работе насоса на глубине. Однако при увеличении числа качаний и глубины спуска насоса, силы инерции и других факторов реальные факторы искажают вид динамограммы, так что диагностика неполадок в работе насосного оборудования становится затруднительной. Для слежения за работой насоса в этом случае необходимо располагать динамограммой, полученной непосредственно у плунжера насоса путем глубинных измерений. Техническая реализация такой системы в промышленном масштабе приведёт к некоторым трудностям. Работы различных авторов, посвящённые моделированию и применению этой методики во всевозможных постановках, приведены в [3-5; 6, стр.48-56; 7, стр.1-12; 8, стр.35-72]. В последние годы были созданы некоторые новые математические методы и методики определения расчета плунжерной диаграммы по измеренным наземным данным. Решены задачи определения величины усилий, действующих на плунжер ГН, а также значений перемещения плунжера по данным одних лишь наземных измерений.

Дифференциальное уравнение продольных колебаний штанги с учётом сил сопротивления, пропорциональных скорости движения плунжера, имеет вид [6, стр.52]:

$$a^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - b \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (1.1)$$

Требуется найти решение уравнения (1.1) при следующих начальных

$$u(x, 0) = 0, \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} (t = 0) = 0 \quad (1.2)$$

и граничных условиях

$$u(0, t) = u_0(t), \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} (x = 0) = \frac{P_0(t)}{Ef} \quad (1.3)$$

Здесь $u(x, t)$ – абсолютное перемещение произвольного сечения колонны штанг (КШТ), м; x – координаты рассматриваемого сечения, м; t – время, с; b – константа вязкого трения, 1/с; a – скорость звука в материале штанг, м/с.; $u_0(t)$, $P_0(t)$ – известные функции.

Автор американского патента [3] для решения уравнения (1.1) использует классический метод – усечённый ряд Фурье. Сущность метода заключается в том, что сигнал, заданный в виде закона изменения во времени перемещения полированного штока (рис.1) и нагрузки на полированный шток (рис.2), раскладывают на простые тона, затем определяют их амплитуды

и фазовые углы в любом сечении КШт, после чего проводят гармонический синтез в точке приёма сигнала.

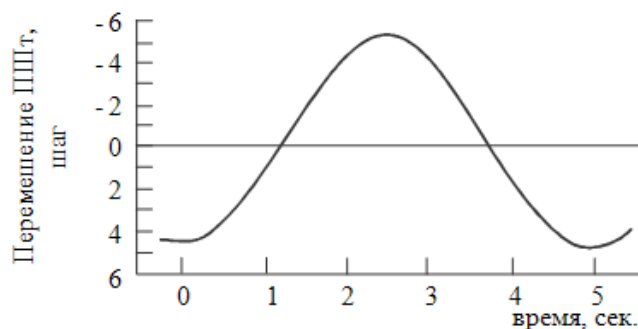


Рис.1 Перемещения полированного штока

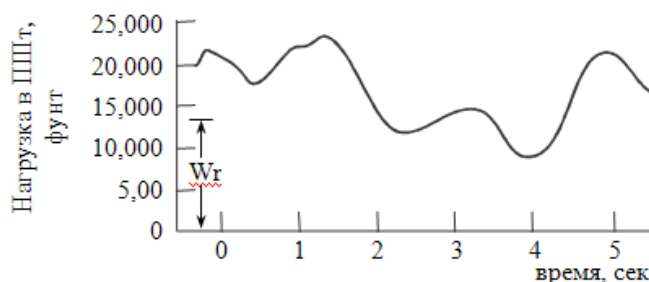


Рис.2 Нагрузка в полированном штоке

Эта же задача по расшифровке передаваемого сигнала также была решена интегрированием телеграфного уравнения методом Даламбера-Римана [6, стр.48-56]. При этом методе не нужно проводить гармонический анализ исходной функции, а достаточно взять два их значения в интервале времени, необходимом для пробега по штангам прямой и отраженной в волнах деформации. По этим двум значениям, вводя поправку на искажение трением, определяют характеристики сигнала, принимаемого на другом конце штанг в середине указанного интервала времени, при нулевых начальных и граничных условиях.

2. Постановка задачи. Из вышеизложенного следует, что существующие способы расчета плунжерной динамограммы на основе неполного телеграфного уравнения с использованием данных измерения хода полированного штока (ПШт) и нагрузки на ПШтв [5; 6, стр.48-56] имеют определённые недостатки. В частности, в работе [5] коэффициент затухания (C) определяется через фактор затухания. Однако эти формулы пригодны только для тексотропных жидкостей, вязкость которых зависит от величины скорости сдвига. Как показал У.Л. Уилкинсон: «если тексотропную жидкость, находящуюся в состоянии покоя, деформировать с постоянной скоростью сдвига (скорость КШт), то ее структура будет постепенно разрушаться, а кажущаяся вязкость снижаться со временем до равновесного значения» [9, стр.24]. Следовательно, при работе станка-качалки ГН с определенной скоростью, изменения значения вязкости даже более тяжелой нефти не будет зависеть от скорости.

В работе [6, стр.48-56] в решение уравнения входят интегралы, и определение интегралов ставит жесткие требования к приему параметров динамограммы. Поэтому в статье

ставится задача определить плунжерную динамограмму с помощью преобразований Лапласа.

3. Решение задачи. Существуют различные подходы к решению данного вопроса с использованием дифференциального уравнения (1.1) – (1.3) штанги с учетом сил сопротивления [7, стр.1-12; 8, стр.35-72]. В данной работе используется интегральное преобразование Лапласа [10, стр.54-58; 11, стр.260-286]. Применение преобразования Лапласа не только существенно сокращает вычислительную работу, но одновременно дает значительно большую обзорность решения.

Применив интегральное преобразование Лапласа к дифференциальному уравнению (1.1) с учетом нулевых начальных условий, уравнение в изображениях представим в виде:

$$a^2 \frac{d^2 \overline{u(x,s)}}{dx^2} = s^2 \overline{u(x,s)} - sb \overline{u(x,s)} \quad (3.1)$$

Или

$$a^2 \overline{u_{xx}}(x,s) = (s^2 - sb) \overline{u}(x,s) \quad (3.2)$$

После применения преобразования граничные условия примут вид:

$$\overline{u}(0,s) = \overline{u_0}(s), \quad \overline{u_x}(0,s) = -\frac{1}{Ef} P_0(s) \quad (3.3)$$

Где s – параметр преобразования. Черточкой сверху обозначены изображения по Лапласу одноименных функций.

Решение задачи (3.2) – (3.3) ищем в виде:

$$\overline{u}(x,s) = \overline{C_1}(s) e^{-k(s)x} + \overline{C_2}(s) e^{k(s)x} \quad (3.4)$$

Коэффициенты $\overline{C_1}(s)$ и $\overline{C_2}(s)$ определяются из граничных условий (3.3):

$$\overline{u}(x,s) = c_1(s) \cdot e^{-k(s)x} + c_2(s) \cdot e^{k(s)x}$$

$$\overline{u_x} = -c_1(s) \cdot k e^{-kx} + k c_2 e^{kx}$$

$$\overline{u_{xx}} = k^2 c_1 \cdot e^{-kx} + k^2 c_2 e^{kx}$$

$$a^2 k^2 c_1 e^{-kx} + a^2 k^2 c_2 e^{kx} = (s^2 - sb)(c_1 e^{-kx} + c_2 e^{kx})$$

$$a^2 k^2 c_1 = c_1 (s^2 - sb), \quad a^2 k^2 c_2 = c_2 (s^2 - sb)$$

$$k^2 = \frac{s^2 - sb}{a^2},$$

Из граничных условий:

$$\begin{cases} c_1 + c_2 = \overline{u_0}(s) \\ c_1 - c_2 = \frac{\overline{P_0}(s)}{Efk(s)} \end{cases} \text{ или } c_1(s) = \frac{1}{2} \left(\overline{u_0} + \frac{\overline{P_0}}{Efk} \right), \quad c_2(s) = \frac{1}{2} \left(\overline{u_0} - \frac{\overline{P_0}}{Efk} \right).$$

С учетом (3.4) в (3.2) получим:

$$\overline{u}(x,s) = 0,5 \left(\overline{u_0}(s) + \frac{a \overline{P}(s)}{Ef \sqrt{s^2 - bs}} \right) e^{\frac{x \sqrt{a^2 - bs}}{a}} + 0,5 \left(\overline{u_0}(s) - \frac{a \overline{P_0}(s)}{Ef \sqrt{s^2 - bs}} \right) e^{\frac{x \sqrt{s^2 - bs}}{a}} \quad (3.5)$$

Выполняя обратное преобразование Лапласа получаем оригинал функции $\overline{u}(x,s)$ в следующем виде:

$$L^{-1}\left(e^{\frac{x\sqrt{a^2-bs}}{a}}\right) = e^{-\frac{bx}{2a}} \delta(t-x/a) + \frac{bx}{2a} e^{-\frac{bt}{2}} \frac{I_1\left(\frac{b}{2}\sqrt{t^2-x^2/a^2}\right)}{\sqrt{t^2-x^2/a^2}} \quad (3.6)$$

$$L^{-1}\left(e^{\frac{x\sqrt{a^2-bs}}{a}}\right) = e^{\frac{bx}{2a}} \delta(t+x/a) - \frac{bx}{2a} e^{\frac{bt}{2}} \frac{I_1\left(\frac{b}{2}\sqrt{t^2+x^2/a^2}\right)}{\sqrt{t^2+x^2/a^2}}$$

$$u(x,t) = 0,5 \left(u_0(t-l/a) e^{-\frac{bx}{2a}} I_0\left(0,5b\sqrt{t^2-\frac{x^2}{a^2}}\right) + u_0(t+l/a) e^{\frac{bx}{2a}} I_0\left(0,5b\sqrt{t^2+\frac{x^2}{a^2}}\right) \right) +$$

$$\frac{1}{2bEf} \left(P_0(t-l/a) \left(e^{-\frac{bx}{2a}} + \frac{be^{-\frac{bt}{2}}}{2} I_1\left(\frac{b}{2}\sqrt{t^2-\frac{x^2}{a^2}}\right) \right) \right) +$$

$$+ P_0(t+l/a) \left(e^{\frac{bx}{2a}} - \frac{be^{-\frac{bt}{2}}}{2} I_1\left(\frac{b}{2}\sqrt{t^2+\frac{x^2}{a^2}}\right) \right) \quad (3.7)$$

Обозначая

$$\varepsilon = \sqrt{t^2 - \frac{x^2}{a^2}}, \quad \mu = \sqrt{t^2 + \frac{x^2}{a^2}}, \quad \vartheta = 0,5b \text{ получаем:}$$

$$u(x,t) = 0,5 \left(u_0(t-l/a) e^{-\frac{bx}{2a}} I_0(\varepsilon\vartheta) + u_0(t+l/a) e^{\frac{bx}{2a}} I_0(\varepsilon\vartheta) \right) +$$

$$+ \frac{1}{2bEf} \left(P_0(t-l/a) \left(e^{-\frac{bx}{2a}} + \frac{be^{-\frac{bt}{2}}}{2} I_1(\varepsilon\vartheta) \right) + P_0(t+l/a) \left(e^{\frac{bx}{2a}} - \frac{be^{-\frac{bt}{2}}}{2} I_1(\varepsilon\vartheta) \right) \right) \quad (3.8)$$

Учитывая, что

$P(x,t) = Ef \cdot \frac{\partial U(x,t)}{\partial x}$, из (3.8) и используя асимптотику функций Бесселя для соответствующих значений аргумента, можем упростить далее и получить формулу для практического расчета, при глубине спуска насоса $2.10^3 m$ определяем:

$$I_0(z) = 1 + \frac{z^2}{4} + \frac{z^4}{64} + \dots \approx 1 + 0,034 \approx 1,$$

$$I_1(z) = 0,5z + \frac{z^3}{1.3} + \frac{z^5}{1.3.5} + \dots \approx 0,5z,$$

получаем:

$$u(x,t) = 0,5 \left(u_0(t-l/a) e^{-\frac{bx}{2a}} + u_0(t+l/a) e^{\frac{bx}{2a}} \right) +$$

$$+ \frac{\vartheta}{2Ef} \left(P_0(t-l/a) \left(e^{-\frac{bx}{2a}} + \varepsilon\vartheta^2 e^{-\vartheta t} \right) + P_0(t+l/a) \left(e^{\frac{bx}{2a}} - \varepsilon\vartheta^2 e^{-\vartheta t} \right) \right) \quad (3.9)$$

$$P(x,t) = \frac{bEf}{4a} \left(u_0(t+l/a) e^{\frac{bx}{2a}} - u_0(t-l/a) e^{-\frac{bx}{2a}} \right) +$$

$$+0,5\vartheta^2(P_0(t+l/a)e^{\frac{bx}{2a}} + P_0(t-l/a)e^{\frac{-bx}{2a}}) \quad (3.10)$$

В результате машинного эксперимента определение границы изменения значений основного параметра – коэффициента трения b не представляет трудности.

В [7, стр.1-12; 8, стр.35-72] при численных расчетах принято, что $b \approx 0,1-0,5$. Это значение параметра трения получено при серьезных допущениях относительно свойств неоднородной жидкости при стесненном движении внутри насоса.

Задаем аналитический вид изменения функции $u_0(t)$ в виде: $u_0(t) = 0.5L_0(1 - \cos \frac{2\pi}{T}t)$, где L_0 – длина хода плунжера, T – период качаний.

$$u(x,t) = 0,25L_0 \left(\left(1 - \cos \frac{2\pi}{T}(t-l/a)\right) e^{\frac{-bx}{2a}} + \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T}(t+l/a)\right) e^{\frac{bx}{2a}} \right) + \\ + \frac{\vartheta}{2Ef} (P_0(t-l/a)(e^{\frac{-bx}{2a}} + \varepsilon\vartheta^2 e^{-\vartheta t}) + P_0(t+l/a)(e^{\frac{bx}{2a}} - \mu\vartheta^2 e^{-\vartheta t})) \quad (3.11)$$

$$P(x,t) = \frac{b}{4a} \left(\left(1 - \cos \frac{2\pi}{T}(t+l/a)\right) e^{\frac{bx}{2a}} - \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T}(t-l/a)\right) e^{\frac{-bx}{2a}} \right) + \\ + 0,5\vartheta^2 (P_0(t+l/a)e^{\frac{bx}{2a}} + P_0(t-l/a)e^{\frac{-bx}{2a}}) \quad (3.12)$$

Это обстоятельство существенно облегчает вычисление значений перемещения и нагрузки на шток плунжера и нахождение аналитических выражений, входящих в формулы.

Учитывая, что при $x = l$, $\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = \frac{P(l,t)}{Ef}$ находим выражение для определения изменения на плунжерную нагрузку:

$$P(l,t) = \frac{b}{4a} \left(\left(1 - \cos \frac{2\pi}{T}(t+l/a)\right) e^{\frac{bl}{2a}} - \left(1 - \cos \frac{2\pi}{T}(t-l/a)\right) e^{\frac{-bl}{2a}} \right) + \\ + 0,5\vartheta^2 (P_0(t+l/a)e^{\frac{bl}{2a}} + P_0(t-l/a)e^{\frac{-bl}{2a}}) \quad (3.13)$$

Таким образом, полученное простое аналитическое выражение (3.10) по сравнению с формулами, приведенными в [5; 6, стр.48-56], позволяет более точно определить плунжерные динамограммы глубоких нефтяных скважин по данным наземной динамограммы. Примером могут служить наземные и плунжерные динамограммы скважины 720 1-го промысла “Shirvan Oil Company”. Глубина спуска насоса 819 м., ход полированного штока 1.5 м., диаметр колонны штанг 32 мм, число качаний за минуты 3,7. Рис. 3а, 3б, 3в показывают ход полированного штока, усилие на подвеске и наземную динамограмму соответственно. Графики хода и усилие показывают 1.5 цикла работы. Рис. 4а, 4б, 4в показывают ход плунжера, усилие на плунжере и плунжерную динамограмму за цикл работы соответственно.

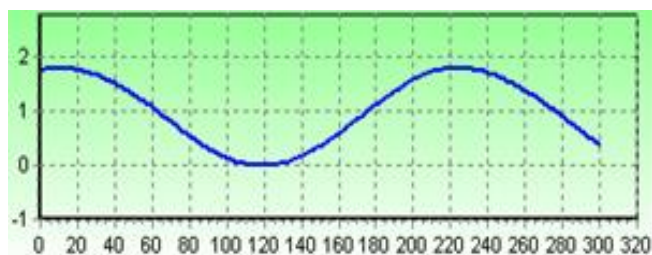


Рис. 3а Ход полированного штока

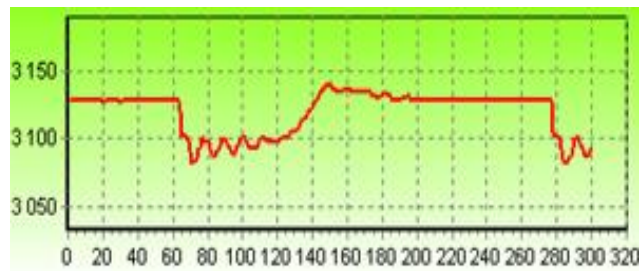


Рис. 3б Усилие на подвеске

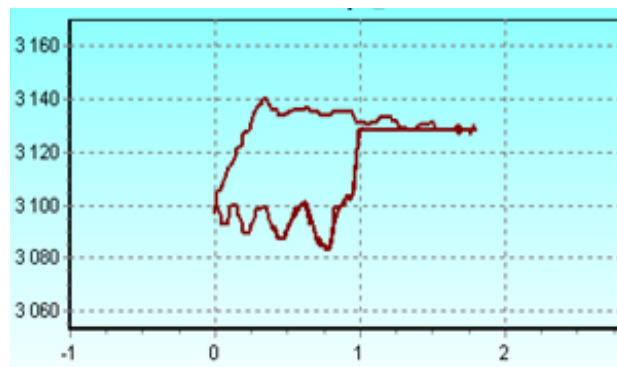


Рис. 3в Наземная динамограмма

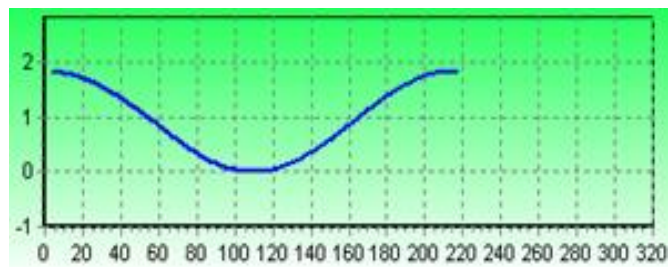


Рис. 4а Ход плунжера

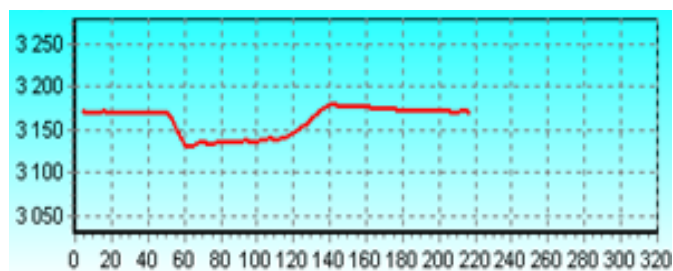


Рис. 4б Усилие на плунжере

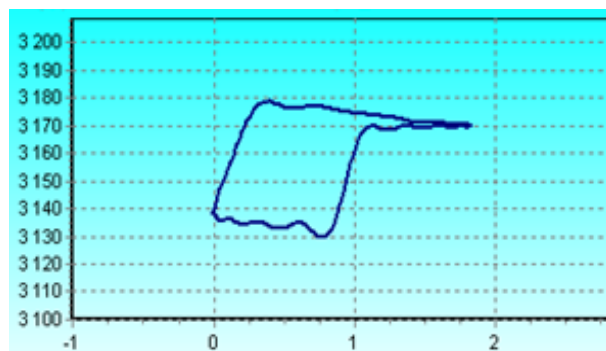


Рис. 4в Плунжерная динамограмма

Данный пример показывает, что плунжерная динамограмма улучшает качество диагностирования состояния подземного оборудования. Дает возможность более точного определения процента заполнения насоса. Относительно скважины 720 можно определить, что:

- имеется слабая утечка в клапанах;
- низкий процент заполнения насоса.

Поэтому необходимо увеличить спуск насоса и определить новый режим работы с увеличением числа качаний, так как число качаний меньше и процент заполнения насоса около 50.

Для определения константы трения, входящей в уравнения (3.9) – (3.14), предлагается следующая формула, содержащая специфические особенности работы ГН:

$$b = \frac{v}{F_3} + \beta^* \vartheta \quad (3.14)$$

где F_3 и ϑ F_3, ϑ – соответственно, площадь поперечного сечения зазора между КШТ и НКТ (см^2) и скорость потока через данный зазор ($\text{см}/\text{с}$); v – кинематическая вязкость ($\text{см}^2/\text{с}$); β^* – структурный коэффициент, характеризующий извилистость и непостоянство сечения зазора (в связи с наличием штанговых муфт).

Известно, что в глубоких скважинах, где площадь поперечного сечения зазора между НКТ и КШТ имеет минимальное значение скорость потока (при постоянстве дебита) максимальна [9, стр.20-45; 11, стр.260-286]. При этом кинематическая вязкость (v) оказывает демпфирующий эффект, и с увеличением v значение коэффициента трения возрастает.

Данная формула получена из модифицированной формулы Дарси при нелинейном законе фильтрации флюидов в пласте коллектора:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{\mu}{K} v + \beta_* \rho \vartheta^2 \quad (3.15)$$

где $\frac{dP}{dx}$ – градиент давления по длине жидкостной колонны скважин ($\text{МПа}/\text{см}$); K и ρ – соответственно, коэффициент проницаемости коллектора (или зазора между КШТ и трубой) (см^2) и плотность фильтруемого флюида ($\text{кг}/\text{см}^3$).

При $F_3=4,9 \text{ см}^2$, соответствующей диаметрам КШТ – 2,0 см и насоса 3,2 см, и изменении вязкости от 1 до 10 см^2 значение константы трения (b) изменяется в пределах от 0,2 до 2,04.

4. Заключение. Для определения плунжерной динамограммы нефтяных скважин по данным наземной динамограммы разработан алгоритм решения математической задачи с использованием преобразования Лапласа. Приведен конкретный пример, подтверждающий качество и надежность полученного алгоритма. Предложено выражение, позволяющее с учетом специфических особенностей откачки пластовой жидкости в глубинно-насосной скважине, определить константу трения. Показано, что с увеличением глубины скважин значение данного параметра возрастает.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики – Грант № EIF-RITN-MQM-2/IKT-2-2013-7(13) - 29/15/1

Литература

1. Sadov V.B. Opredelenie defectov oborudovaniya neftyanoy skvazhiny po dinamogramme [Definition of Defects of Equipment of Oil Well on Dynamometer Card]// Bulletin of South Ural State University. Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 16–25 (in Russian).
2. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Методика обработки динамограмм в ИИС управления штанговыми глубинными насосами// Вестник УГАТУ, 2012, Т.16, №6, с.32-37.
3. Алиев Т.А., Рзаев Аб. Г., Гулуев Г. А., Рзаев Ас. Г., Юсифов И.Б. Способ управления процессом добычи нефти и устройство для его осуществления. Евразийский патент № 019848. 2014г.
4. Roberto L.Soz. Review of down hole dynamometer. Testing// Society of petroleum engineer, Inc.SPE 3517 Exxon company USA, 1998.
<http://www.upcovzla.com/contenidol biblioteca/Analysis Carta Dinagrafica.pdf/>
5. Gibbs S.G. Method of determining sucker rod pump performance. US Patent 3, 343, 409, issued September 26, 1967, pp.3-7
6. Вирновский А.С. Теория и практика глубинно насосной добычи нефти. М.: Недра, 1971, 184с.
7. Ковшев В.Д., Сидоров М.Е., Светлакова С.В. Моделирование динамограммы станка качалки, нормальная работа насоса. Нефтегазовое дело, 2004. (<http://www.ogbus.ru>).
8. Касьянов В.М. Аналитический метод контроля работы глубинных штанговых насосов. М., изд. ВНИИОЭНГ, 1973.
9. Уилкинсон У. Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемещение и теплообмен. Пер. с англ. М.: Мир, 1964, 216 с.
10. Ришмюллер Г. и др. Добыча нефти глубинными штанговыми насосами. – Терниц: Шёллер - Блекманн Гмбх, 1988. 150 с.
11. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. М.: Наука, 1971, с.286.

UOT 622.276: 519.688

Ab.H. Rzayev, A.B. Həsənov, Q.A. Quluyev, As.H. Rzayev, F.H. Paşayev, M.H. Rezvan

Dərin neft quyuları üçün quyunun çıxışında alınan informasiyaya görəplunjer diaqramının təyin olunma üsulu

Quyuağzı dinamoqramma məlumatları əsasında plunjerin dinamoqrammasının təyin olunması üçün tam olmayan teleqraf tənliyinin yeni həll üsulu verilmişdir. Bu tənliyə daxil olan sürütmə sabitini təyin etmək üçün yeni üsul işlənmişdir.

Açar sözlər: vibrasiya, dərinlik nasosu, diferensial tənlik, dinomaqram, yük, yerdəyişmə, Laplas çevirməsi, sürütmə

Ab.H. Rzayev, A.B. Hasanov, G.A. Guluyev, As.H. Rzayev, F.H. Pashayev, M.H. Rezvan

Determining plunger dynamometer card based on the data of wellhead measurements

The authors propose a new method for determining the values of basic parameters for constructing of plunger dynamometer cards based on the data of ground measurements. A new solution to the differential equation of longitudinal vibrations of the deep-well pump rod is proposed, using the Laplace integral transform. An example confirming the quality and reliability of the obtained algorithm is given.

Keywords: vibration, bottomhole pump, differential equation, dynamometer card, load, displacement, Laplace transform, friction