МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 624.042.7

Ю. А. БУРЬЯН
В. Н. СОРОКИН
В. С. КОРНЕЕВ

Омский государственный технический университет

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ СКВАЖИННОГО ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

В работе построены переходные процессы в забойной зоне скважины при единичном, ступенчатом воздействии давления на устье.
Силовой элемент источника – гидравлический пульсатор устанавливается на устье скважины, заполненной жидкостью, и создает перепад давления с требуемой частотой, который доводится до забойной зоны.

В настоящее время одной из перспективных технологий повышения нефтеотдачи является вибросейсмическое воздействие, которое осуществляется наземными мощными низкочастотными вибромодулями с вибротяговым усилием не менее 100 т.с. [5], [6].

Альтернативой мощным наземным сейсмическим источникам может стать скважинный источник, который лишён недостатков, присущих поверхностным источникам, так как его излучатель устанавливается ниже зоны малых скоростей. Кроме того, такой скважинный источник может использоваться для интенсификации выхода метана из угольных залежей с помощью вибросейсмической обработки, вследствие чего актуальной является проблема создания скважинного источника, который создаёт в толще горных пород низкочастотное волновое поле с интенсивностью, достаточной для решения задач виброобработки.

Рассмотрим возможность создания волнового поля в толще пласта с помощью доведения перепада давления на устье скважины до забойной зоны по заполненной жидкостью скважине.

Пусть скважина заполнена жидкостью и от ее устья до забойной зоны передается перепад давления ΔP с заданной частотой. В этом случае линия ее контакта с грунтом будет работать как заглубленный источник колебаний. Известно [1], что условием допустимости деформации грунта под штампом в пределах упругости является выполнение неравенства:

$$\Delta x \le 10^{-3}\ r \qquad (1)$$

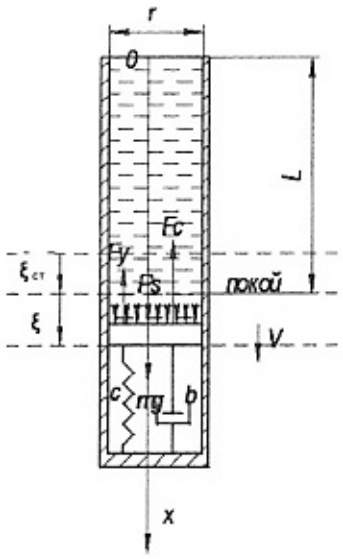


Рис. 1. Расчетная схема скважины

где Δx – линейная деформация грунта под штампом;
r – радиус круглого жесткого штампа.

Известно также [7], что жесткость грунта - С под круглым жестким штампом, на который действует сила F, определяется из выражения:

$$C = \frac{F}{\Delta x} = \frac{3\pi^2}{4}\rho \cdot V_S{}^2 r_0\left(1-\gamma^2\right), \qquad (2)$$

где $\gamma = \frac{V_S}{V_p} \approx \frac{1}{\sqrt{3}}$

V_s, V_p – скорость соответственно поперечных и продольных волн;
ρ – плотность грунта.

Учитывая, что допустимый перепад давления $\Delta P_{доп} = \frac{F}{r^2\pi}$ и соотношение (1), в (2) допустимый перепад давления $\Delta P_{доп}$, создаваемый действием силы F на круглый штамп радиуса r_0 будет равен:

$$\Delta P_{доп} = \frac{3p}{4} c V_s{}^2\left(1-\gamma^2\right)\cdot 10^{-3}. \qquad (3)$$

Для пород средней несущей способности [7] $\Delta P_{доп} \approx 8-10$ МПа.

Сейсмическая волна, создаваемая пульсатором в устье скважины, будет действовать как на стенки обсадной трубы, так и на дно скважины. При этом будут возникать деформации грунта в радиальном и вертикальном направлениях. Следуя [7], будем в первом приближении теоретически представлять деформацию грунта в радиальном направлении как действие источника в виде пульсирующей сферы, а деформацию в вертикальном направлении грунта как источник в виде осциллирующей вниз сферы.

Сравнительный анализ амплитуд перемещений этих источников, в предположении, что они находятся на значительной глубине, проведенный в [7], показывает, что в низкочастотной области (2-16 Гц) осциллирующий шар излучает продольную волну в 100 – 1000 раз эффективнее, чем пульсирующий шар. Вследствие этого представленный в данной работе источник упругих волн можно рассматривать как заглубленный осциллирующий шар, для которого при направлении силы F вертикально вниз смещение горной породы $|x|$ на расстоянии R описывается выражением:

$$|x| \approx F \cdot \frac{1}{R \cdot 4\pi\rho V_p^2} \qquad (4)$$

Качественное сравнение такого скважинного источника и мощного низкочастотного поверхностного, для которого амплитуда продольной волны в дальней зоне (на глубине R = h) определяется выражением отличающимся от (4) множителем 0,5 [6]

$$|x| \approx F \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \rho V_p{}^2 \cdot h}, \qquad (5)$$

показывает, что их эффективность сравнима, так как в заглубленном источнике энергия не расходуется на формирование поверхностных волн и, кроме того, он имеет сравнительно низкую стоимость, следовательно на месторождении может быть установлено несколько таких источников.

Протяженную скважину, заполненную жидкостью, можно рассматривать как гидравлическую линию с распределенными параметрами. Уравнения неустановившегося ламинарного движения сжимаемой среды в упругой цилиндрической трубе круглого сечения имеет вид [2]:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{2\tau_0}{\rho r} &= -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p_n}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} &= -\frac{1}{B_{тр}}\frac{\partial p_n}{\partial t} \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

где $\frac{1}{B_{тр}} = \frac{1}{B} + \frac{1}{E'_{ст}}$ – приведенный модуль упругости трубы;

$E'_{ст} = \frac{\delta E_{ст}}{2r}$;

ρ – плотность жидкости;
τ_0 – квазистационарное касательное напряжение на стенке трубы;
$E'_{ст}$ – модуль упругости стенки трубы;
δ – толщина стенки трубы;
B – модуль объемной упругости среды;
p_n, v – соответственно давление и скорость среды.

Будем полагать, что труба заканчивается поршнем, через который осуществляется контакт жидкости с грунтом. Расчетная схема скважины представлена на рис.1

Дифференциальное уравнение движения поршня будет иметь вид:

$$m\ddot{\xi} = -F_y - F_c + mg + P_s\Sigma = -c\lambda - b\xi + mg + (\rho gL + P_n)\Sigma, \qquad (7)$$

где $\Sigma = \pi r^2$ – площадь поршня,
$m = m_n + m_r$,
m_n – масса поршня,
m_r – присоединенная масса грунта,
c – жесткость грунта,
b – коэффициент демпфирования грунта,
L – длина скважины,
g – ускорение свободного падения,
ξ – перемещение поршня,
t – время.

$P_s = \rho gL + P_n(L,t)$

$\lambda = \xi_{CT} + \xi$

ξ_{CT} – перемещение поршня под действием внешних сил в состоянии покоя (рис1).

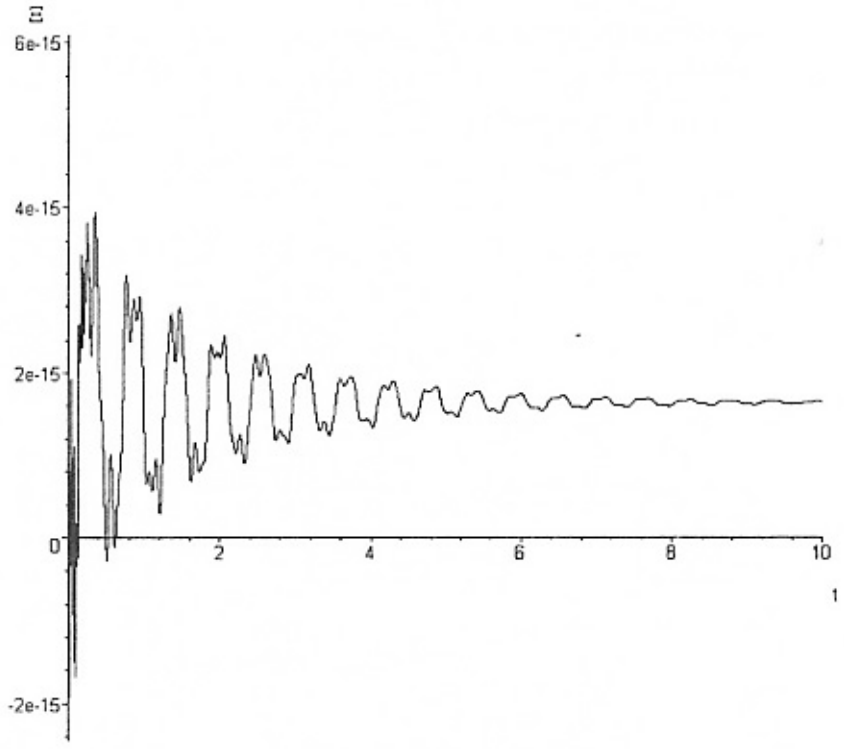


Рис. 2. Переходный процесс перемещения поршня в конце скважины при единичном ступенчатом давлении в начале линии

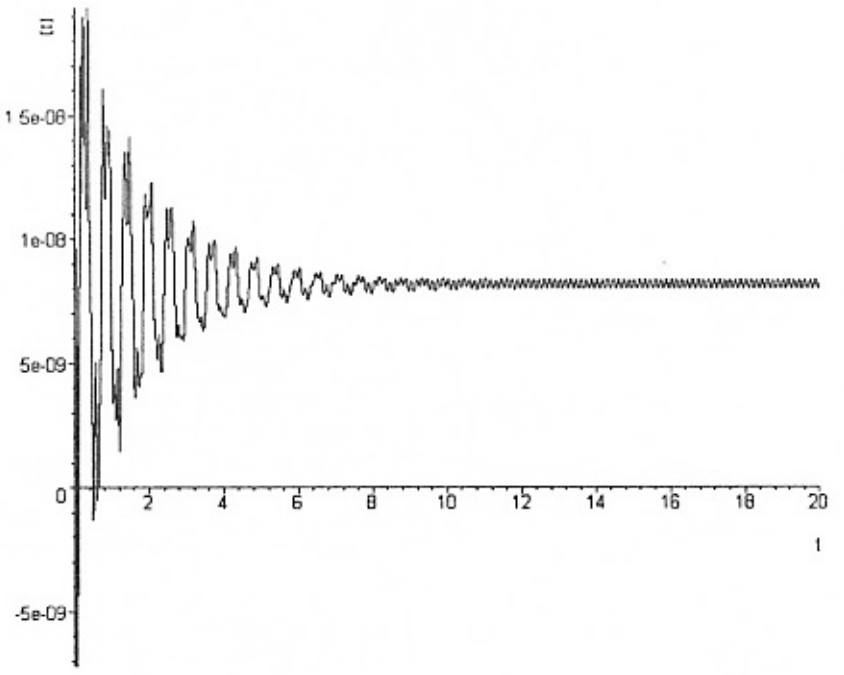


Рис. 3. График перемещения Ξ(t) при синусоидальном входном воздействии

Уравнение (7) преобразуем к виду:

$$m\xi = -c\xi_{CT} - c\xi - b\xi + mg + \rho gL\Sigma + P_n(L,t)\Sigma$$

Выбирая начало координат в положении равновесия, получим:

$$\xi + k^2\xi + 2n\xi = P_n(L,t)\frac{\Sigma}{m} \qquad (8)$$

где $k^2 = \frac{c}{m}$, $2n = \frac{b}{m}$.

Система дифференциальных уравнений (6) и (8) описывает поведение жидкости в трубе.

Граничные условия для уравнений (6) и (8) будут:

$$\begin{aligned} v(t, x = L) &= \xi(t) \\ p(t, x = 0) &= p_0(t) \end{aligned} \qquad (9)$$

Уравнения (6) и (7) после одномерного преобразования по Лапласу при нулевых начальных условиях, учитывая, что

$$\tau_0(s) = W \cdot V(x,s)$$

где $V(x,s)$, $P_n(x,s)$, $\Xi(s)$ — значения скорости, давления и перемещения поршня соответственно.

$W = \frac{\tau_0(s)}{V(s)} = \frac{4\rho\nu}{r}$ — передаточная функция для касательного напряжения на стенке для квазистационарного значения [2] будут иметь вид:

$$\left.\begin{aligned} V(x,s)s &= -\frac{2W}{\rho r_0}V(x,s) - \frac{1}{\rho}\frac{\partial(P_n(x,s))}{\partial x} \\ P_n(x,s) &= -\frac{B_{тр}}{i\omega}\frac{\partial V(x,s)}{\partial x} \\ s^2\Xi(s) + 2ns\Xi(s) + k^2\Xi(s) &= P_n(L,s)\frac{\Sigma}{m} \end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Граничные условия для уравнений (10) после преобразования примут вид:

$$V(x = L,s) = s\Xi(s)$$

Определяя из дифференциальных уравнений (10) $\Xi(s)$ получаем следующее:

$$\Xi(s) = \frac{P1\cdot\Sigma}{m\cdot ch(\vartheta\cdot L)s^2 + 2m\cdot ch(\vartheta\cdot L)n\cdot s + m\cdot ch(\vartheta\cdot L)k^2 + \rightarrow}$$

$$\rightarrow \frac{}{+\Sigma\cdot sh(\vartheta\cdot L)\cdot B\cdot\vartheta} \quad (11)$$

где $\vartheta^2 = \left[s\rho + \frac{2W}{r_0}\right]\frac{s}{B_{mp}}$ — коэффициент распространения,

$\vartheta = \pm(\theta + i\varepsilon) = \pm(\theta + s\varepsilon_0)$ — коэффициент распространения в комплексной форме,

$\theta = 4\nu\frac{\chi_a}{r^2}\sqrt{\frac{\rho}{\chi_p\beta\cdot B_{mp}}}$ — коэффициент затухания [2],

$\varepsilon = \omega\varepsilon_0 = \omega\sqrt{\frac{\chi_p\beta\cdot\rho}{B_{mp}}}$ — коэффициент фазы [2],

ν - вязкость жидкости

$\chi_a = 247$, $\chi_p\beta = 1$ — коэффициенты, зависящие от частоты [2] ($\omega = 44\ c^{-1}$)

Для определения переходных процессов перемещения поршня на конце скважины проведем аппроксимацию Паде [8]. Известно, что

$$sh(s\cdot T) = \frac{e^{sT} - e^{-sT}}{2}$$
$$ch(s\cdot T) = \frac{e^{sT} + e^{-sT}}{2} \quad (12)$$

Аппроксимации Паде ограниченная четвертой степенью ряда:

$$e^{-sT} = \frac{a_0 - a_1T\cdot s + a_2T^2\cdot s^2 - a_3T^3\cdot s^3 + a_4T^4\cdot s^4 + \ldots}{a_0 + a_1T\cdot s + a_2T^2\cdot s^2 + a_3T^3\cdot s^3 + a_4T^4\cdot s^4 + \ldots}, \quad (13)$$

где коэффициенты:

$a0 = 1677.6$

$a1 = 838$

$a2 = 180$

$a3 = 20$

$a4 = 1$

Применяя уравнение (12) и аппроксимацию (13) к уравнению (11), получим при значениях $L = 200$ м, $r_0 = 0.0445$ м, $\rho = 10^3\ кг/м^3$, $B_{тр} = 2\cdot10^9$ Па, $Pn = 10$МПа, $m = 1$кг, $c = 0{,}2\cdot10^7$, $b = 752{,}5$, $\nu = 10^{-6}$

$$\frac{\Xi(s)}{P1(s)} = \frac{0.0133(0.0004s^4 - 0.06s^3 +}{0.366\cdot10^{-6}s^{10} + 0.0007s^9 + 0.13\cdot10^7s^8 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+3.6\cdot s^2 - 118.6\cdot s + 1677)}{+0.26\cdot10^8s^7 + 0.49\cdot10^{11}s^6 + 0.29\cdot10^{12}s^5 + 0.226\cdot10^{15}s^4 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{(0.0004s^4 + 0.06s^3 + 3.6\cdot s^2 + 118.6\cdot s + 1677)}{+0.6\cdot10^{15}s^3 + 0.21\cdot10^{18}s^2 + 0.23\cdot10^{18}s + 10^{20}} \quad (14)$$

Переходный процесс при единичном ступенчатом входном воздействии определим из уравнения (14) разделив его на оператор Лапласа и и проведя обратное преобразование.

Результат представлен на рис. 2

Процесс при синусоидальном воздействии вида:

$$P1(t) = \frac{Pn}{2} + \frac{Pn}{2}\sin(\omega t)$$

Или — по Лапласу

$$P1(s) = \frac{\frac{Pn}{2}}{s} + \frac{\frac{Pn}{2}}{s^2 + \omega^2} \quad (17)$$

При значении частоты 44 c^{-1} выходное значение $\Xi(t)$ определится из уравнения (14) и (17) с последующим обратным преобразованием Лапласа. Результат представлен на рис. 3

Таким образом, проведенные исследования показывают, что время установления процесса в длинной гидравлической линии при приведенных выше параметрах составляет 10 с.

Библиографический список

1. Николаев А.В. и др. Вибропросвечивание Земли./Деп. в ВИНИТИ, №2549-74.

2. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.:Машиностроение, 1987 г. 424с.

3. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы. М.: Машиностроение, 1982 г.

4. Новые технологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер. Вибрационные технологии. — М.: Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики, 2002 г.

5. Симонов Б.Ф. и др. Технология вибросейсмического воздействия с земной поверхности для повышения нефтеотдачи пластов. — Нефт. хоз-во, 1998, №4.

6. Курленя М.В. и др. Об эффективности вибросейсмического воздействия на нефтепродуктивные пласты с дневной поверхности. — ФТПРПИ, 1999, №2.

7. Чичинин И.С. Вибрационное излучение сейсмических волн. — М.: Недра, 1984 г.

8. Тетельбаум И. М. и др. Практика аналогового моделирования динамических систем. — М.: Энергоатомиздат, 1987 г. 384 с.

БУРЬЯН Юрий Андреевич, доктор технических наук, профессор, зав. каф. ОТМиАУ.

СОРОКИН Владимир Николаевич, доктор технических наук, доцент каф. ОТМиАУ.

КОРНЕЕВ Владимир Сергеевич, аспирант каф. ОТМиАУ.

Статья поступила в редакцию 10.11.06 г.

© Бурьян Ю.А., Сорокин В.Н., Корнеев В.С.