

УДК 622.23.05

**АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ
СКВАЖИННОГО ИМПУЛЬСНОГО ВИБРОИСТОЧНИКА**

Б. Ф. Симонов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: Simonov_bf@mail.ru, Красный проспект, 54, 630090, г. Новосибирск, Россия*

На основе рядов Фурье выполнен анализ спектрального состава сигналов импульсного скважинного виброисточника с двумя силовыми элементами и электромагнитным молотом. Проведено сравнение амплитудно-частотных характеристик импульсного и дебалансного виброисточников адекватного размера. Показано, что по амплитудам выходного сигнала импульсного виброисточника и составляющих его спектра он существенно превосходит амплитуды соответствующих сигналов дебалансного виброисточника.

Скважинный импульсный виброисточник, частота, период колебаний, спектр, длительность импульса, амплитуда сигнала

DOI: 10.15372/FTPRPI20220108

Наряду с ростом мирового потребления углеводородов, нефтедобывающая промышленность всех стран сталкивается с ухудшением качества эксплуатационных и разведанных запасов углеводородного сырья. Большинство месторождений России находятся на стадии падающей добычи, а среди разведанных запасов преобладают мелкие и средние месторождения с подтвержденными запасами, не превышающими 100 млн т. Необходимый для развития промышленности прирост добычи можно обеспечить только за счет увеличения коэффициента извлечения нефти, который в настоящее время не превышает 30–40 %. Этого можно добиться с помощью широко развивающихся в настоящее время методов увеличения нефтеотдачи (МУН) продуктивных пластов [1–5].

Среди большого многообразия МУН наибольшей универсальностью, позволяющей их комплексовать с другими видами, обладают методы вибровоздействия на пласт [6–9]. Значительный вклад в развитие технических средств и технологии данного направления составляют работы Института горного дела СО РАН [10–12]. В них рассмотрены виброисточники, обеспечивающие воздействие на нефтяной пласт с дневной поверхности и через скважину. Виброисточники, воздействующие на пласт через скважину, могут быть как выполненными на основе дебаланса с приводом от вращательного двигателя, так и импульсными, на основе электромагнитного молота, с одним или двумя силовыми гидравлическими элементами (СЭ) [13–15].

Приведен сравнительный анализ сейсмических сигналов на уровне нефтяного пласта от поверхностного виброисточника и от скважинного импульсного виброисточника с силовыми элементами [16]. Показано, что амплитуда сигнала на малых расстояниях от излучающей скважины, в которую помещен виброисточник, значительно больше, чем амплитуда сигнала

на глубине пласта от поверхностного виброисточника. Отношение амплитуды сигнала к потребляемой мощности для скважинного виброисточника больше в 100 раз по сравнению с виброисточником, расположенным на поверхности. Таким образом, скважинный импульсный виброисточник с электромагнитным приводом и двумя силовыми элементами не только более технологичен и удобен в эксплуатации, но и энергетически эффективнее.

Цель настоящей работы — анализ спектрального состава излучаемых сигналов скважинного импульсного виброисточника на базе электромагнитного молота и двух силовых элементов, а также сопоставление их с характеристиками дебалансного скважинного виброисточника.

Конструктивные схемы двух виброисточников представлены на рис. 1. Электромагнитный импульсный виброисточник (рис. 1а) включает электромагнитный ударный узел 1, идентичные нижний и верхний силовые элементы 2, гидронасос 3. Устройство опускают в обсадную колонну скважины 4 на подвеске насосно-компрессорных труб 5. По достижении требуемой глубины активируют гидронасос 3, который нагнетает рабочую жидкость в эластичные камеры 6 силовых элементов 2 под давлением P_0 . Камеры 6, расширяясь, раздвигают пуансоны 7 в радиальном направлении, обеспечивая распорную силу F на обсадную колонну скважины 4.

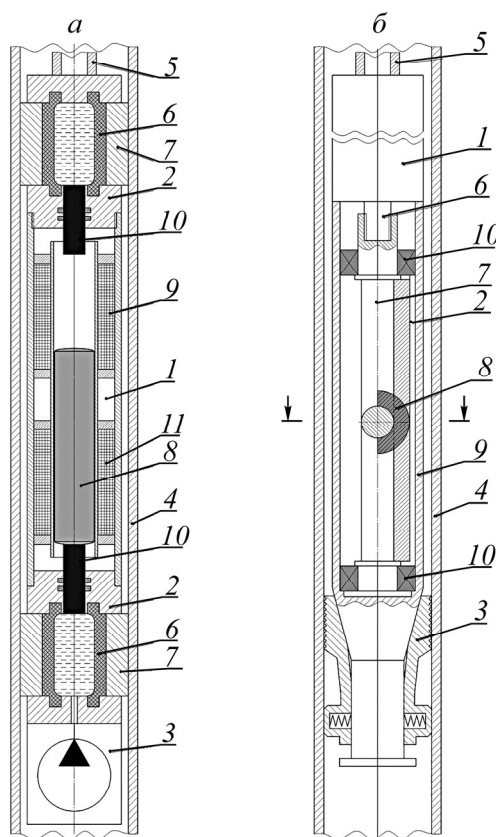


Рис. 1. Конструктивные схемы двух скважинных виброисточников: а — импульсного; б — дебалансного гармонического (пояснения в тексте)

Далее включают электромагнитный ударный узел 1. Боек 8 под действием электромагнитной силы верхней катушки 9 ускоренно движется вверх в течение времени обратного хода t_{ox} и в конце обратного хода импульсно воздействует на плунжер 10 верхнего силового элемента. Плунжер 10 сжимает рабочую жидкость, создавая в ней импульс гидравлического давления P_u с амплитудой P_m , который передается на обсадную колонну в виде импульса силы с амплиту-

дой F_m . В момент удара происходит отключение верхней катушки 9 и включение нижней катушки 11. Боек 8 под действием силы тяжести и электромагнитной силы нижней катушки движется вниз в течение времени прямого хода t_{nx} и наносит удар по плунжеру 10 нижнего силового элемента, генерируя импульсы давления и силы. По результатам экспериментальных лабораторных исследований виброисточника при напряжении питания электромагнитного ударного узла более 100 В в системе возникает режим равных импульсов в верхнем и нижнем силовых элементах $P_{u1} = P_{u2}$ [16].

Дебалансный гармонический виброисточник (рис. 1б) включает погружной электродвигатель 1, дебалансный блок 2, устройство силового замыкания 3 в обсадной колонне скважины 4. Виброисточник опускают в скважину на подвеске насосно-компрессорных труб 5 на требуемую глубину. Механически активируют устройство силового замыкания 3, обеспечивая осевую и радиальную фиксацию виброисточника. Включают погружной электродвигатель 1, вал 6 которого приводит во вращение вал 7 дебалансного блока. На валу 7 расположен дебаланс 8, при его вращении возникает центробежная сила F_u . Вал 7 установлен в корпусе 9 на подшипниках 10, через которые происходит передача центробежной силы на корпус 9 и далее через устройство силового замыкания 3 на обсадную колонну скважины 4.

С целью обеспечения корректности результатов сравнительного анализа рассматривались виброисточники адекватных радиальных и линейных размеров диаметрами 115 мм для работы в обсадной колонне скважины наружным диаметром 148 мм.

В электромагнитном импульсном виброисточнике два силовых элемента разнесены между собой на длину электромагнитного молота (рис. 1а). Это значит, что точки излучения сейсмических сигналов в геосреду нефтяного пласта сдвинуты в пространстве. Однако для установления гармонического состава излучаемых сигналов принимаем следующие допущения.

1. Излучение сигналов от двух силовых элементов происходит из одной точки, предполагается, что оба силовых элемента совмещены и находятся на одном уровне. Их амплитуды давления P_m и длительности импульсов давления t_u одинаковы.

2. Временные интервалы между излучающими импульсами давления P_u в силовых элементах от ударов по их штокам бойком молота при прямом и обратном ходе бойка близки между собой $t_{ox} \approx t_{nx}$.

Рассмотрению будет подлежать гармонический состав импульсного давления в силовых элементах и их воздействие на обсадную колонну в сравнении с силовым воздействием дебалансного скважинного виброисточника.

ОДНОПОЛЯРНЫЙ ВИБРОИСТОЧНИК

Два силовых элемента виброисточника (рис. 1а), находящиеся внутри обсадной колонны скважины, могут воздействовать на нее однонаправлено — только в сторону ее расширения. Данные импульсы в дальнейшем будем называть однополярными. На практике возможна реализация только такого воздействия на обсадную колонну и на заколонное пространство (нефтяной пласт).

Осциллограмма однополярных импульсов давления в силовых элементах $P_u(t)$, преобразованная с учетом принятых допущений, представлена на рис. 2а. На ней P_m — амплитуда импульсов давления; t_u — время импульсов давления в силовых элементах; T — период импульсов. Для однополярных импульсов с учетом принятого допущения $T = (t_{nx} + t_{ox}) / 2$.

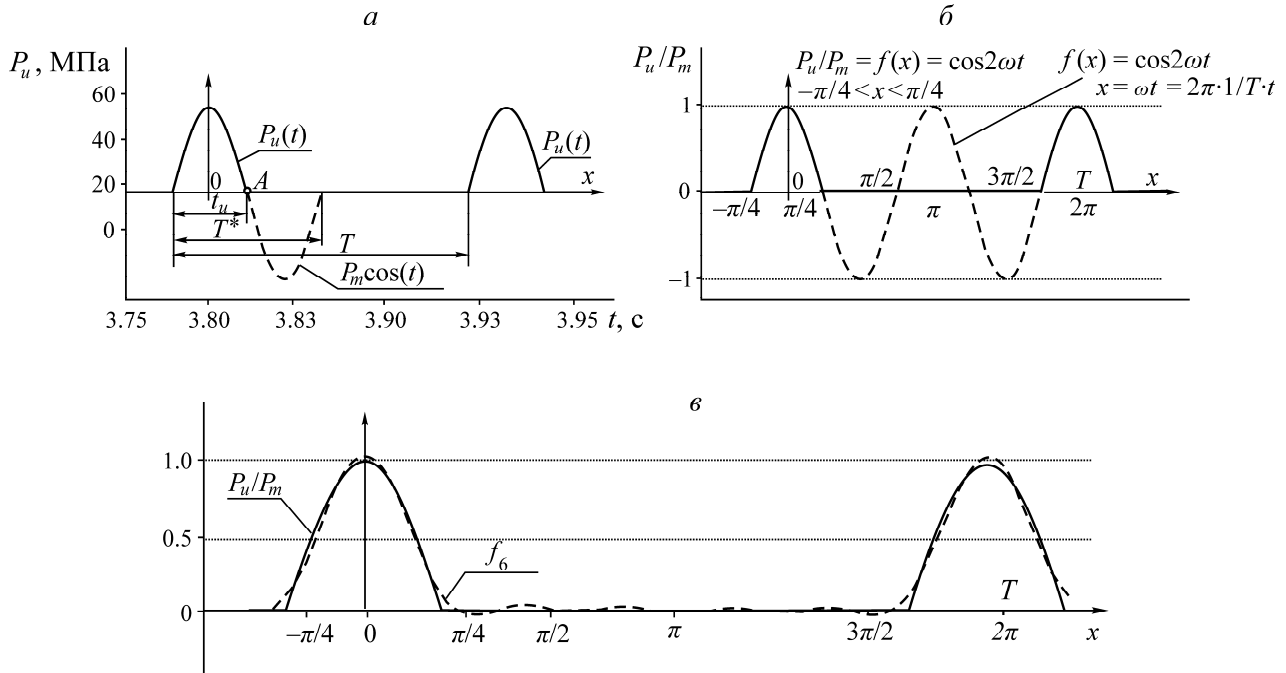


Рис. 2. Спектральный состав импульсов давления однополярного виброисточника: *а* — осциллограмма однополярных импульсов давления; *б* — гармоническая аппроксимация однополярных импульсов давления в выбранной системе координат на интервале $-\pi \leq x = \omega t = 2\pi f t = 2\pi t / T \leq \pi$; *в* — график однополярных импульсов давления в силовых элементах однополярного виброисточника и суммы гармонических составляющих при его спектральном разложении

Продолжим единичный импульс P_u центрально-симметрично относительно точки A . Будем рассматривать полученную функцию $P_u(t)$ как некоторую повторяющуюся с периодом $T^* = 2t_u$.

Установим взаимосвязь между T и T^* . Для этого нанесем на данную систему координат функцию $f(t) = P_m \cos(\pi t / t_u)$ и сопоставим ее с полученной функцией $P_u(t)$. Сравнение показало, что они совпадают с отклонениями, не превышающими 1 %. Значит, для анализа допустимо аппроксимировать функцию $P_u(t)$ функцией $P_m \cos(\pi t / t_u)$.

Определим взаимосвязь между t_u , T , T^* исходя из возможности аппроксимировать функцию $P_u(t)$ на время действия импульса некоей гармонической функцией.

По данным эксперимента t_u и T лежат в следующих пределах:

$$\begin{aligned} 0.029 \leq t_u \leq 0.051 \text{ с,} \\ 0.13 \leq T \leq 0.21 \text{ с.} \end{aligned}$$

Для выполнения расчетов, придавая им некоторые конкретные значения: $t_u = 0.035$ с, $T = 0.14$ с, $T^* = 0.07$ с, получаем $T / T^* = f^* / f = 2$, где $f = 1 / T$; $f^* = 1 / T^*$.

Однополярные импульсы давления $P_u(t)$ силовых элементов в выбранной на рис. 2б системе координат на отрезке $-\pi \leq x = \omega t = 2\pi f t = 2\pi t / T \leq \pi$ можно представить следующей относительной периодической функцией:

$$\frac{P_u}{P_m}(x) = f(x) \begin{cases} 0, & \text{при } -\pi \leq x \leq -\frac{\pi}{4}, \\ \cos 2x, & \text{при } -\frac{\pi}{4} \leq x \leq \frac{\pi}{4}, \\ 0, & \text{при } \frac{\pi}{4} \leq x \leq \pi \end{cases}$$

с периодом $T = 2\pi$.

Раскладывая данную функцию в ряд Фурье и ограничиваясь шестью членами ряда, находим [17, 18]:

$$\begin{aligned} f_6(x) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^6 a_k \cos kx, \\ a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/4}^{\pi/4} f(x) dx, \\ a_k &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/4}^{\pi/4} f(x) \cos kx dx, \quad k = 1 \dots 6. \end{aligned} \quad (1)$$

Подставляя функцию $f(x)$ в (1) и произведя интегрирование, получаем коэффициенты:

$$a_0 = 0.31832; a_1 = 0.301; a_2 = 0.25; a_3 = 0.180068; a_4 = 0.106106; a_5 = 0.04287; a_6 = 0.$$

Таким образом, импульсная функция $P_u / P_m(x)$ по выражению (1) состоит из суммы гармоник:

$$\begin{aligned} \frac{P_u}{P_m}(\omega t) &\approx f_6(\omega t) = 0.159 + 0.3 \cos \omega t + 0.25 \cos 2\omega t + 0.18 \cos 3\omega t + \\ &+ 0.106 \cos 4\omega t + 0.0428 \cos 5\omega t. \end{aligned} \quad (2)$$

Проверяя правильность выполненных вычислений, подставляем в (2) значение $t = 0$:

$$f_6(0) = 0.159 + 0.30 + 0.25 + 0.18 + 0.106 + 0.04287 = 1.0377.$$

Данный результат хорошо совпадает с теоретическим значением $P_u(0) / P_m = f(0) = 1$, согласно рис. 2б. На рис. 2в представлены графики суммы всех составляющих выражения (2) $f_6(x)$. Она совпадает с графиком импульса $P_u(x) / P_m$ с точностью до 5% на всей оси x . Это позволяет использовать выражение (2) для инженерных расчетов.

Применяя (2), можно получить амплитуды гармоник давления и сил, действующих на обсадную колонну на соответствующих частотах $f_k = f \cdot k$, где $k = 0 \dots 6$:

$$P_{mk} = P_m a_k, \quad F_{mk} = P_{mk} S_n. \quad (3)$$

Здесь a_k — коэффициент ряда (1), $P_m = 15$ МПа — экспериментально измеренная величина [19, 21], $S_n = 23 \cdot 10^3$ мм² — площадь касания пуансона.

Используя выражения (3) и коэффициенты рядов (1), (2), получаем значения P_{mk} и F_{mk} :

f_k , Гц	0	7.14	14.28	21.42	28.56	35.700
P_{mk} , МПа	2.38	4.50	3.75	2.70	1.59	0.642
F_{mk} , кН	54.85	103.50	86.25	62.10	36.53	14.760

Из этих данных следует, что рассматриваемый виброисточник с двумя силовыми элементами и электромагнитным молотом (рис. 1а) при генерировании однополярных импульсов давления на стенки обсадной колонны образует постоянную составляющую давления $p_0 = 2.38$ МПа и силу $F_0 = 54.85$ кН, прижимающие пуансоны к стенкам скважины дополнительно к давлению предварительного поджатия P_0 , создаваемого отдельным насосом ($p_0 < P_0$). С момента начала работы молота в вибросточнике давление отдельного насоса P_0 , обеспечивающее предварительное поджатие пуансонов силовых элементов к стенкам скважины, может быть снижено.

Используя значения P_{mk} , F_{mk} , нанесем составляющие спектра сигнала рассматриваемого однополярного виброисточника $F_{mk}(f_k)$ на ось абсцисс f (рис. 3) в виде столбиков и объединим их вершины некоторой огибающей (кривая 1). На этом же рисунке представлена экспериментальная зависимость максимальной амплитуды силы от частоты $F_m(f)$ для импульсного скважинного виброисточника с двумя силовыми элементами (кривая 2).

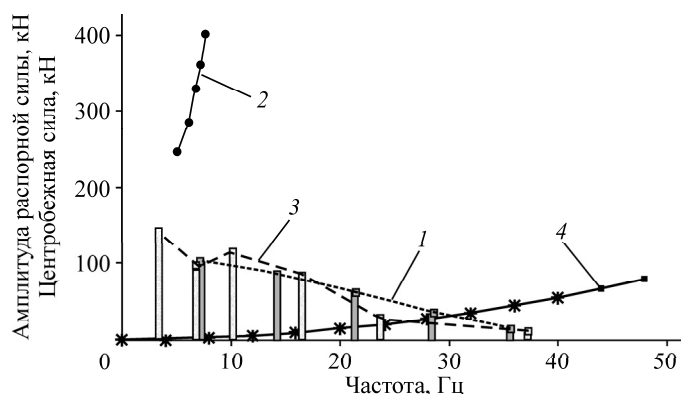


Рис. 3. Зависимость силовых характеристик от частоты для различных виброисточников (пояснения в тексте)

Из рис. 3 видно, что амплитуды импульсов силы скважинного импульсного виброисточника с двумя силовыми элементами F_m достигают 300–400 кН и находятся в узком частотном диапазоне до 8 Гц. Однако спектральный состав гармоник этих импульсов лежит в диапазоне до 35 Гц с амплитудами 5–110 кН. Этот диапазон охватывает зону доминантных частот при проведении вибровоздействия на нефтяной пласт, приводя к резонансным явлениям в нем [10–12].

ДВУПОЛЯРНЫЙ ВИБРОИСТОЧНИК

Представляется интересным рассмотреть теоретически виброисточник в другом варианте — как некоторый “фиктивный”, в котором силовые элементы создают разнонаправленные импульсы давления на обсадную колонну. Один силовой элемент осуществляет расширение обсадной колонны, а другой как бы обеспечивает ее сжатие. В этом случае можно рассматривать воздействие на обсадную колонну двуполярными импульсами.

Сравним два варианта виброисточников — реального и “фиктивного”, полагая, что “фиктивный” виброисточник по конструкции такой же (рис. 1а), но его силовые элементы обеспечивают разнонаправленные импульсы давления на обсадную колонну, одинаковые

по амплитуде и длительности. Сравнение позволит определить целесообразность создания источника, который бы обеспечивал не расширение, а сжатие обсадной колонны для воздействия на нефтяной пласт.

Осциллограмма двуполярных импульсов давления в силовых элементах “фиктивного” виброисточника $P_u(t)$ с учетом принятых допущений и обозначений представлена на рис. 4а. На ней P_m и t_u — амплитуда импульсов давления и их длительность, T — период следования импульсов с учетом их полярности. При допущении 2 в данном случае $T = t_{ox} + t_{nx}$.

Рассматривая импульсы $P_u(t)$ как полуволны некоторой гармонической функции в выбранной системе координат с периодом $T^* = 2t_u$, установим взаимосвязь между периодами T и T^* , а значит, и между их частотами $f = 1/\tau$ и $f^* = 1/\tau^*$ с учетом возможного диапазона изменений

$$0.029 \leq t_u \leq 0.051 \text{ с,}$$

$$0.25 \leq T \leq 0.39 \text{ с.}$$

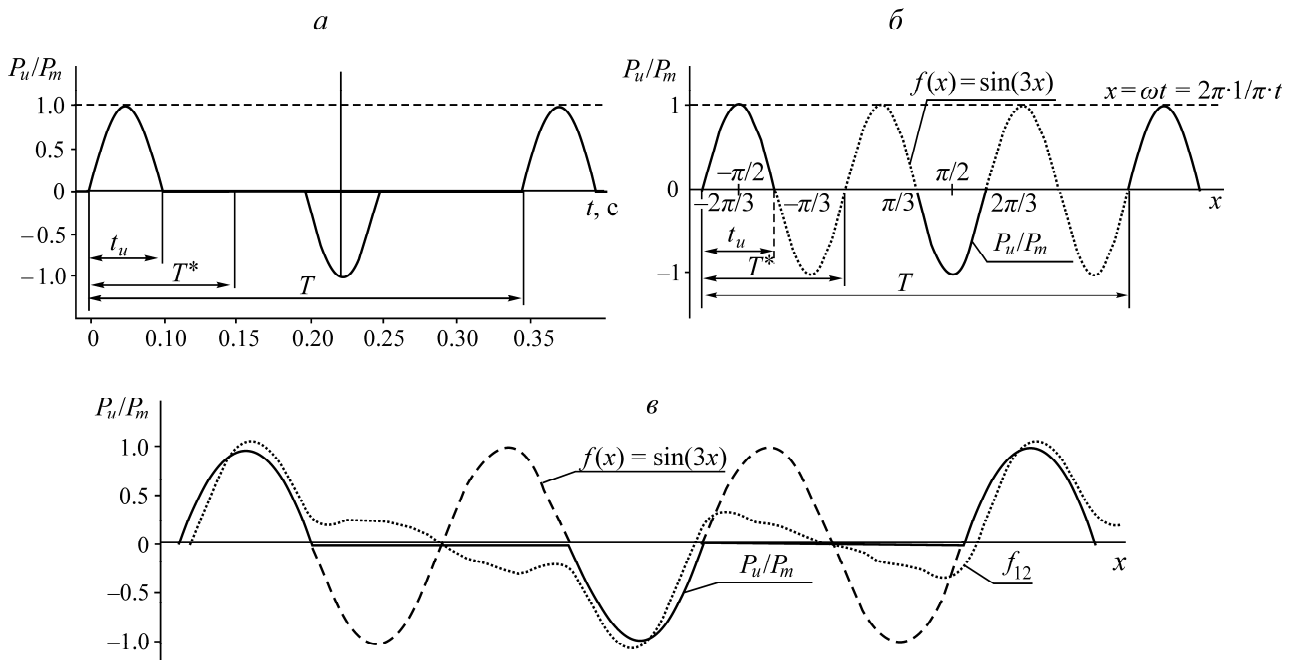


Рис. 4. Спектральный состав импульсов давления двуполярного виброисточника: а — осциллограмма двуполярных импульсов давления в силовых элементах виброисточника; б — гармоническая аппроксимация однополярных импульсов давления в выбранной системе координат на интервале $-\pi \leq x = \omega t = 2\pi ft = 2\pi t/T \leq \pi$; в — графики двуполярных импульсов давления и суммы гармонических составляющих при его спектральном разложении

Выбирая для анализа значения $T = 0.2949 \text{ с}$, $f = 3.390 \text{ Гц}$, $t_u = 0.0491 \text{ с}$, $T^* = 0.0983 \text{ с}$, $f^* = 10.17 \text{ Гц}$, получаем $T/T^* = f^*/f = 3$. Импульсное давление в силовых элементах $P_u(t)$, приведенное к P_m в относительных единицах P_u/P_m в выбранной системе координат (рис. 4б) на отрезке $-\pi \leq x = \omega t = 2\pi ft = 2\pi t/T \leq \pi$, можно представить следующей периодической функцией $P_u(x)/P_m = f(x)$ с периодом $T = 2\pi$:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } -\pi \leq x \leq -\frac{2\pi}{3}, \\ \sin 3x, & \text{при } -\frac{2\pi}{3} \leq x \leq -\frac{\pi}{3}, \\ 0, & \text{при } -\frac{\pi}{3} \leq x \leq \frac{\pi}{3}, \\ \sin 3x, & \text{при } \frac{\pi}{3} \leq x \leq \frac{2\pi}{3}, \\ 0, & \text{при } \frac{2\pi}{3} \leq x \leq \pi. \end{cases} \quad (4)$$

Раскладывая данную функцию в ряд Фурье [17, 18] и ограничиваясь двенадцатью членами ряда, получаем

$$f_{12}(x) = \sum_{k=1}^{12} b_k \sin kx, \quad (5)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin kx, \quad (6)$$

$$k = 1 \div 12.$$

Подставляя функцию $f(x)$ из выражения (4) в (6) и производя интегрирование, находим коэффициенты b_k при $k = 1 \div 12$:

$$b_1 = -0.143508; b_2 = -0.27567; b_3 = 0.3333; b_4 = 0; b_5 = -0.2412; b_6 = 0;$$

$$b_7 = 0.08870; b_8 = 0; b_9 = 0; b_{10} = 0; b_{11} = -0.029538; b_{12} = 0.$$

Таким образом, импульсная функция $P_u / P_m(x)$ по выражению (5) может быть представлена в виде ряда гармоник

$$\begin{aligned} \frac{P_u}{P_m}(x) \approx f_{12}(x) = & -0.413508 \sin x - 0.27567 \sin 2x + 0.3333 \sin 3x - 0.2412 \sin 5x + \\ & + 0.08270 \sin 7x - 0.029538 \sin 11x. \end{aligned} \quad (7)$$

В качестве проверки правильности вычислений убедимся в том, что $f_{12}(x) \approx f(x) = \pm 1$ при $x = \pm \pi / 2$. Подставляя $x = \pm \pi / 2$ в выражение (7), получаем

$$f_{12}\left(\frac{\pi}{2}\right) = -0.413508 - 0.3333 - 0.2412 - 0.08270 + 0.029538 = -1.04117,$$

$$f_{12}\left(-\frac{\pi}{2}\right) = +1.04117,$$

что является признаком удовлетворительной сходимости ряда для дальнейших инженерных вычислений.

Используя выражение (7), находим амплитуды гармоник давления и сил, действующих на обсадную колонну от “фиктивного” виброисточника на соответствующих частотах $f_k = fk$, ($k = 0 \div 12$). Для этого в (3) подставляем b_k вместо a_k . Значения амплитуд спектральных составляющих давлений в камере СЭ под пуансонами и усилий на стенках скважины для дипольного виброисточника представлены ниже.

f_k , Гц	3.390	6.170	10.170	16.590	23.730	37.290
P_{mk} , МПа	6.195	4.125	4.995	3.618	1.240	0.442
F_{mk} , кН	142.000	94.800	114.000	83.200	28.290	10.170

Отметим, что у импульсного давления и силы, действующей на стенки обсадной колонны у “фиктивного” виброисточника, нет постоянной составляющей. Используя эти данные, можно представить в виде диаграммы составляющие спектра сигнала рассматриваемого “фиктивного” дипольного виброисточника $F_{mk}(f_k)$ на ось абсцисс f и объединить вершины столбцов огибающей (рис. 3, кривая 3). Из представленных столбчатых диаграмм для двух типов импульсных виброисточников (рис. 3, кривые 1, 3) видно, что амплитуды частотного спектра дипольного виброисточника незначительно превышают амплитуды спектра однополярного виброисточника только в низкочастотном диапазоне (до 15–18 Гц), а выше этой частоты они принимают меньшее значение. Из этого следует, что стремиться к созданию импульсного виброисточника, осуществляющего дипольное импульсное воздействие на обсадную колонну, нецелесообразно, поскольку создание такого источника будет достаточно сложным, а преимуществом по амплитудам частотных составляющих спектра перед однополярным он не обладает и даже проигрывает ему в диапазоне частот выше 18 Гц.

Для сравнения на этом же рисунке приведена амплитудно-частотная характеристика $F_{mk}(f_k)$ (рис. 3, кривая 4) для типового дебалансного виброисточника адекватных размеров, выполненного по конструктивной схеме, представленной на рис. 1б [19]. Показано, что дебалансный виброисточник может обеспечивать воздействие гармонической силой на стенки обсадной колонны во всем диапазоне своих рабочих частот до 40–50 Гц. Однако, сравнивая между собой зависимости 2 и 4, можно увидеть, что амплитудно-частотная характеристика скважинного дебалансного виброисточника лежит ниже, чем аналогичная характеристика импульсного виброисточника (рис. 3, кривая 4) с двумя силовыми элементами и электромагнитным молотом и его спектральными составляющими силы, действующей на стенки скважины практически во всем диапазоне частот до 30 Гц. Это свидетельствует о большей эффективности виброисточника на силовых элементах с электромагнитным молотом.

ВЫВОДЫ

Скважинный импульсный виброисточник с двумя силовыми элементами и электромагнитным молотом диаметром до 115 мм обеспечивает амплитуды импульсного воздействия силы до 300–400 кН с частотой до 8 Гц на стенки скважины диаметром до 148 мм. При этом спектральный состав гармоник от однополярных импульсов данного виброисточника лежит в диапазоне до 35 Гц с амплитудами 5–110 кН, значительно превосходя по спектральным характеристикам силового воздействия типовой дебалансный виброисточник в диапазоне до 20 Гц. Этот частотный диапазон охватывает зону доминантных резонансных частот нефтяных пластов, что показывает перспективность использования данных виброисточников для повышения нефтеотдачи пластов виброволновыми методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Газизов А. А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки. — М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2002. — 639 с.
2. Sheng J. J., Leonhardt B., and Azri N. Status of polymer-flooding technology, J. Can. Petr. Technol., 2015, Vol. 54, Issue 2. — P. 116–126.
3. Bera A. and Babadagli T. Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: A review, Applied Energy, 2015, Vol. 151. — P. 206–226.
4. Delamaide E., Bazin B., Rousseau D., and Degre G. Chemical EOR for heavy oil: The Canadian experience, SPE EOR Conference at oil and gas West Asia 2014: Driving integrated and innovative EOR, 2014. — P. 566–596.

5. Esmailzadeh P., Sadeghi M. T., Fakhroueian Z., Bahramian A., and Norouzbeigi R. Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO_2 , SiO_2 and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery, J. Nat. Gas Sci. Eng., 2015, Vol. 26. — P. 1294–1303.
6. Ганиев О. Р., Ганиев Р. Ф., Украинский Л. Е. Основы волновой механики продуктивных пластов // ДАН. — 2016. — Т. 466. — № 3. — С. 298–301.
7. Дыбленко В. П., Марчуков Е. Ю., Туфанов И. А. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами // РАЕН. — 2012. — Кн. 1. — С. 338.
8. Кузнецов О. Л., Симкин Э. М., Чилингар Дж. Физические основы вибрационного и акустического воздействия на нефтегазовые пласты. — М.: Мир, 2001. — 260 с.
9. Кравцов Я. И., Марфин Е. А. Волновое воздействие на продуктивные пласты как универсальный способ повышения эффективности добычи тяжелых нефтей и природных битумов // Георесурсы. — 2011. — № 3. — С. 17–18.
10. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. И., Востриков В. И., Погарский Ю. В., Назаров Л. А. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010. — С. 404.
11. Serdykov S. V. and Kurlenya M. V. Mechanism of oil production stimulation by low-intensity seismic fields, Acoustical Physics, 2007, Vol. 53, No. 5. — P. 618–628.
12. Симонов Б. Ф., Чередников Е. Н., Сердюков С. В., Масленников В. В., Кадышев А. И., Гамзатов С. М., Булавин В. Д., Канискин Н. А., Сибирев А. П., Ноткин В. М., Бачин С. И., Николенко В. В. Технология объемного волнового воздействия на нефтегазовые залежи для повышения углеводородоотдачи пластов // Нефтяное хозяйство. — 1998. — № 4. — С. 42–44.
13. Пат. 2659576 РФ. Скважинный сейсмоисточник / Б. Ф. Симонов, Ю. В. Погарский, А. О. Кордубайло // Оpubл. в БИ. — 2018. — № 19.
14. Пат. 2642199 РФ. Скважинный сейсмоисточник / Б. Ф. Симонов, Ю. В. Погарский, А. О. Кордубайло, Ю. А. Лебедев // Оpubл. в БИ. — 2018. — № 3.
15. Симонов Б. Ф., Кордубайло А. О., Нейман В. Ю., Полищук А. Е. Рабочие процессы в импульсном линейном электромагнитном приводе скважинного виброисточника // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 71–78.
16. Симонов Б. Ф., Опарин В. Н., Кордубайло А. О., Востриков В. И. Экспериментальные исследования эффективности излучения от скважинного импульсного виброисточника // ГИАБ. — 2019. — № 8. — С. 180–189.
17. Ильин В. А., Поздняк Э. Г. Основы математического анализа. Ч. 2. — М.: Наука, 1973. — 447 с.
18. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. — М.: Наука, 1972. — 870 с.
19. Флянтиков А. Д., Савченко А. В., Цупов М. Н., Евстигнеев Д. С. Обоснование конструктивных и энергетических параметров скоростного скважинного дебалансного виброисточника // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019 — Т. 6. — № 2. — С. 272–277.

Поступила в редакцию 31/III 2021
После доработки 15/VI 2021
Принята к публикации 24/XII 2021