

**Распространение звука в перфорированной скважине**Д.Р. Сафиуллин<sup>1,\*</sup>, Е.А. Марфин<sup>2,†</sup>, А.Р. Загидуллина<sup>2‡</sup>

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, институт физики,  
кафедра радиоэлектроники, Россия, 420111, Казань, ул. Кремлёвская, д. 16а  
<sup>2</sup>Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра  
Российской академии наук, Россия, 420111, Казань, Лобачевского, д. 2/31  
(Статья поступила 15.11.2014; Подписана в печать 05.12.2014)

Работа направлена на повышение эффективности акустического воздействия на призабойную зону скважины для увеличения нефтеотдачи пласта. На основе проведенных авторами исследований показано, что учет особенностей распространения звуковых колебаний в перфорированной скважине и выбор режима акустического воздействия позволяет значительно уменьшить потери энергии упругих волн. Исследованы процессы распространения упругих колебаний в скважине и передачи их через перфорационные отверстия в окружающую среду. Получены расчетные формулы для определения частот собственных колебаний и добротности в перфорированной трубе. Определены условия обеспечения резонансного режима.

PACS: 43.20.Вi, 43.28.Py

УДК: 534.231, 534.632

Ключевые слова: скважина, перфорация, собственные колебания, затухание, резонанс, вынужденные колебания, добротность.

**ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время специалисты нефтяной и газовой отраслей проявляют интерес к практическому использованию новых высокоэффективных и рентабельных технологий, обеспечивающих стабильное поддержание, а также прирост добычи нефти в сложных геолого-промысловых условиях. Это обусловлено увеличением доли трудноизвлекаемых запасов нефти и недостаточно высокими показателями методов добычи. Эффективность существующих методов повышения нефтеотдачи можно существенно повысить за счет использования воздействия на продуктивный пласт полем упругих колебаний [1–6]. Упругие возмущения интенсифицируют практически все внутрискважинные процессы. Однако внедрение волновых методов не всегда дает положительный эффект — коэффициент успешности составляет 60–80%. Причина тому заключается в сложности протекающих процессов в пласте, а также в неоптимальном выборе режима волнового воздействия (частоты и амплитуды колебания).

Наиболее часто используемым способом осуществления волнового воздействия является генерация упругих волн в перфорированной скважине на уровне продуктивного пласта с помощью размещенного в ней излучателя [2, 4, 6]. Участок скважины ограничен, как правило, снизу дном обсадной колонны, а сверху излучателем с фильтром или пакером. Такая физическая система является колебательной, т.е. характеризуется собственными колебаниями. Вынужденные колебания в ней на частотах близких к собственным могут усиливаться за счет резонанса, а на других частотах за-

метно поглощаться. Последнее приводит к тому, что в зоне воздействия интенсивность волнового поля не обеспечивает необходимую интенсификацию протекающих процессов.

Целью данной работы является исследование закономерностей распространения упругих волн в имитаторе перфорированной обсадной колонны скважины и изучение ее акустических свойств.

**1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Реальные обсаженные скважины имеют две составляющие собственные колебания. Первая обусловлена стоячими волнами собственно в трубе. Вторая связана с характеристиками перфорационных отверстий. Если для первого случая известны расчетные формулы для частот собственных колебаний, то во втором не все так однозначно — необходимо учитывать многие факторы. Рассмотрим решение задачи для второго случая методом электроакустических аналогий. Согласно этому методу в качестве аналога перепада давления на участке трубопровода принимают падение напряжения на соответствующем участке электрического фильтра, аналога объемной скорости — сила электрического тока. Элемент трубопровода, называемый сужением, эквивалентен катушке индуктивности, а расширением — конденсатору. Если выходной конец сужения открывается в свободное пространство, то реакция излучения на открытом конце выражается в схеме электроакустической аналогии в виде активного сопротивления, которое последовательно с индуктивностью шунтирует выходной конец электрической схемы [7].

При решении приняты следующие допущения:

1. перфорированные отверстия цилиндрические, все одинакового размера и равномерно распределены по скважине (рис. 1.);

\*E-mail: dinar\\_safiullin@mail.ru

†E-mail: marfin\_ea@mail.ru

‡E-mail: zagidullina\_aliiy@mail.ru

2. продуктивный пласт — однородная и изотропная пористая среда, которую в рассматриваемом диапазоне частот колебаний можно считать сплошной средой;
3. потери энергии колебаний за счет диссипации в самой скважине незначительны;
4. метод электроакустических аналогий в данном случае применим.



Рис. 1: Перфорированная труба

Следуя положениям метода электроакустических аналогий исследуемую систему можно представить в виде колебательного контура (рис. 2). При этом аналогом электрической емкости  $C$  является акустическая податливость упругого объема жидкости в обсадной колонне, аналогом индуктивностей  $L_i$  — акустическая проводимость перфорационных отверстий, аналогом активного сопротивления  $R$  — акустическое сопротивление окружающей среды. Комплексное сопротивление  $Z_i$  характеризует потери энергии в перфорационных отверстиях на вязкое трение.

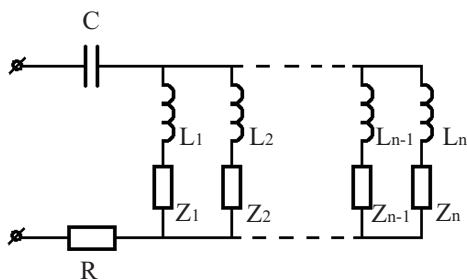


Рис. 2: Электрическая схема — аналогия обсадной колонны скважины

Поскольку  $Z_i$  имеет активную и реактивную составляющие, а характеристики перфорационных отверстий одинаковы ( $L_i = \text{const}$ ,  $Z_i = \text{const}$ ), то указанная электрическая схема может быть представлена в преобразованном виде последовательного колебательного контура, в акустическом отношении — резонатором Гельмгольца. Для определения частоты собственных колебаний и добротности необходимо рассчитать акустиче-

ский импеданс резонатора. Поскольку импеданс резонатора комплексный, т.е. состоит из действительной и мнимой части, то приравнивая мнимую часть нули можно определить резонансную частоту.

Для преобразованной электрической схемы частота собственных колебаний, частота при которой наблюдается резонанс, определяется по формуле [8]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{эфф}} C}} \quad (1)$$

Добротность контура  $Q$  рассчитывается по формуле [8]:

$$Q = \frac{1}{R_{\text{вх}}} \sqrt{\frac{L_{\text{эфф}}}{C}} \quad (2)$$

Таким образом, решение поставленной задачи сводится к определению  $C$ ,  $L_{\text{эфф}}$  и  $R_{\text{эфф}}$ . Причем  $L_{\text{эфф}} = L/n$  — как параллельное соединение  $n$  индуктивностей, а  $R_{\text{эфф}} = R + Z/n$ .

Рассмотрим акустическую податливость упругого объема жидкости в обсадной колонне. Входной импеданс трубы, закрытой жесткой, стенкой, равен [9]:

$$z_{\text{вх}} = \frac{\rho c S}{j \operatorname{tg}(\omega l / c)} \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность,  $c$  — скорость звука,  $S$  — площадь поперечного сечения трубы,  $l$  — ее длина,  $\omega$  — циклическая частота,  $j = \sqrt{-1}$  — мнимая единица.

Для случая, когда длина трубы значительно меньше длины волны ( $l \ll \lambda$ ), тангенс можно заменить его аргументом:

$$z_{2E} = \frac{\rho c S}{j \operatorname{tg}(\omega l / c)} = \frac{1}{j \omega V / (\rho c^2 S^2)} \quad (4)$$

где  $V$  — объем трубы.

Сравнивая полученный результат с формулой емкостного сопротивления  $Z = 1/(j\omega C)$ , получаем, что отрезок трубы, закрытой на одном конце жесткой стенкой, при низких частотах действует как механическая податливость:

$$\frac{dx}{dF} = C = \frac{V}{\rho c^2 S^2} = \frac{C_a}{S^2} \quad (5)$$

где

$$C_a = \frac{V}{\rho c^2} \text{ — акустическая податливость.} \quad (6)$$

Найдем механический импеданс единицы площади поперечного сечения трубы. Допустим, что длина волны больше, чем длина трубы. В этом случае жидкость в трубе под действием градиента давления движется как одно целое без деформации. Механический импеданс единицы площади поперечного сечения трубы в данном случае есть отношение разности давлений

в начале и конце трубы к амплитуде скорости и, усредненной по сечению:

$$Z = \frac{Hl}{\langle v \rangle} \quad (7)$$

где  $H$  — отрицательный градиент давления;  $\langle v \rangle$  — скорость, усредненная по площади поперечного сечения.

Скорость движения несжимаемой вязкой жидкости в круглой трубе подчиняется уравнению Навье–Стокса в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\eta}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (8)$$

которое для установившихся колебаний ( $v = v_0 e^{j\omega t}$ ) при градиенте давления  $\partial p / \partial z = -H e^{-j\omega t}$  преобразуется к виду:

$$\frac{d^2 v_0}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_0}{dr} + k^2 v_0 = -\frac{H}{\eta} \quad (9)$$

Решение (9) должно удовлетворять граничному условию на стенке трубы:

$$v(r)_{r=a} = 0 \quad (10)$$

Для решения (9) введем новую переменную  $x = ka$  и получим:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dv}{dx} + v = -\frac{H}{k^2 \eta} v(x)_{x=ka} = 0 \quad (11)$$

Это выражение имеет решение в виде суммы частного решения уравнения с правой частью и решения однородного уравнения Бесселя нулевого порядка:

$$v = A J_0(x) - \frac{H}{k^2 \eta} \quad (12)$$

Используя граничное условие, определяем постоянную:

$$A = \frac{H}{J_0(ka) k^2 \eta} \quad (13)$$

Таким образом, амплитуда скорости частиц и средняя скорость  $\langle v \rangle$  по сечению трубы жидкости равны:

$$v = -\frac{H}{k^2 \eta} \left[ 1 - \frac{J_0(kr)}{J_0(ka)} \right], \quad (14)$$

$$\langle v \rangle = \frac{2\pi}{\pi a^2} \int_0^a v(r) r dr = -\frac{H}{k^2 \eta} \left[ 1 - \frac{2}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} \right] \quad (15)$$

Разность давлений выражают через отрицательный градиент давления соотношением  $\Delta p = Hl$ . В результате получается формула импеданса единицы поперечного сечения трубы длиной  $l$ :

$$Z = -\frac{k^2 \eta l}{\left[ 1 - \frac{2}{ka} \frac{J_1(ka)}{J_0(ka)} \right]} \quad (16)$$

Для низких частот при вычислении импеданса  $Z$  можно пользоваться приближенными выражениями функций  $J_0(x)$  и  $J_1(x)$  [9]:

$$J_0(x) \approx 1 - \frac{x^2}{4} + \frac{x^4}{64}, J_1(x) \approx \frac{x}{2} \left( 1 - \frac{x^2}{8} + \frac{x^4}{174} \right) \quad (17)$$

при  $x = a\sqrt{2\omega\rho/\eta}(1-j)$ ;  $|x| = 2a\sqrt{2\omega\rho/\eta} < 1$

В этом случае уравнение (17) приближенно можно записать в виде:

$$Z = -\frac{8\eta l}{a^2} + j\omega \frac{4}{3} \rho l \quad (18)$$

где  $a$  — радиус,  $l$  — длина участка трубы. Таким образом, импеданс тонких трубок имеет активную составляющую, равную коэффициенту Пуазейля ( $8\eta l/a^2$ ), и реактивную, которая равна инерционному сопротивлению жидкости. При этом эффективная масса жидкости, составляющая инерционное сопротивление, больше, чем масса жидкости в трубе: масса жидкости в трубе длиной  $l$  составляет на единицу поперечного сечения  $\rho l$ , а эффективная масса  $4/(3\rho l)$ ; вязкость как бы вносит в процесс колебания дополнительную массу.

Если разделить удельный механический импеданс (18) на площадь  $S$ , то получим акустический импеданс участка  $l$  трубы:

$$Z_a = -\frac{8\eta l}{S a^2} + j\omega \frac{4}{3} \frac{\rho l}{S} \quad (19)$$

Переносим полученный результат с учетом краевых эффектов [7] на перфорационное отверстие, получаем что акустическая податливость последнего равна:

$$L = \frac{4}{3} \frac{\rho (l_0 + 0.25\pi d)}{S} = \frac{16}{3} \frac{\rho (l_0 + 0.25\pi d)}{\pi d^2} \quad (20)$$

В работе [7] показано, что если выходной конец сужения открывается в свободное пространство, то реакция излучения на открытом конце выражается в схеме электроакустической аналогии в виде активного сопротивления:

$$R = \frac{\rho \omega^2}{2\pi c} \quad (21)$$

которое последовательно с индуктивностью выходного сужения шунтирует выходной конец электрической схемы.

С учетом выражения (19)  $R_{эфф}$  равно

$$R_{MDD} = \frac{\rho \omega^2}{2\pi c} + \frac{8\eta l}{S a^2 n} \quad (22)$$

где  $\rho$  и  $c$  — плотность и скорость звука окружающей среды.

Таким образом, полученные выражения (6, 20–22) позволяют определить резонансные характеристики исследуемого участка скважины с перфорационными отверстиями.

$$L_{эфф} = L/n, \quad (23)$$

где  $n$  — число перфорационных отверстий.

Частота собственных колебаний определится как:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{эфф}}C}} = \sqrt{\frac{n}{LC}} = \sqrt{\frac{3n\pi d^2 \rho c^2}{16\rho(l_0 + 0,25\pi d)V}} = c \frac{d}{D} \sqrt{\frac{3n_0}{4(l_0 + 0,25\pi d)V}}, \quad (24)$$

где  $d$  — внутренний диаметр сечения перфорационного отверстия,  $D$  — внутренний диаметр обсадной колонны,  $n_0$  — число перфорационных отверстий на единицу длины обсадной колонны,  $l_0$  — длина перфорационного отверстия.

Добротность определяется по формуле (2), где активное сопротивление рассчитывается на резонансной частоте  $\omega_0$ . Учитывая (24) получаем:

$$Q = \left( \frac{\rho\omega_0^2}{2\pi c} + \frac{64}{\pi D^3 n_0} \right)^{-1} \frac{8\rho c}{\pi d D l_m} \sqrt{\frac{l_0 + 0,25\pi d}{3n_0}} \quad (25)$$

где  $l_m$  — длина ограниченного участка обсадной колонны.

Анализ полученных выражений (24) и (25) показывает, что резонансная частота участка перфорированной обсадной колонны скважины зависит лишь от ее геометрических параметров и скорости звука в жидкости, заполняющей ее. Добротность же такой системы зависит как от геометрических свойств скважины, так и физических свойств жидкости и продуктивного пласта.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование особенностей распространения упругих волн проведено на установке, с помощью которого моделируется звуковое поле в обсадной колонне скважины (рис. 3). Колеблущейся средой в данном случае является сжимаемая жидкость (воздух), находящийся в обсадной колонне и перфорационных отверстиях. Металлическая труба (2) со сменными перфорационными отверстиями (3), размещенными на ее поверхности, имитируют обсадную колонну скважины. Расположение отверстий на трубе — двухвинтовое с шагом, обеспечивающим размещение 10 отверстий на каждой линии на протяжении 1 м трубы, что соответствует реальным промышленным условиям. Перфорационные отверстия выполнены в виде втулок натурной длины и диаметра, вворачиваемых в приваренные к трубе патрубки. Кроме того, предусмотрена возможность применения вместо отверстий заглушек, моделирующих заглушенные отверстия или дискретно расположенные перфорации.

С одной стороны перфорированной трубы размещена крышка с динамической головкой (1), через которую с помощью генератора гармонических колебаний (6)

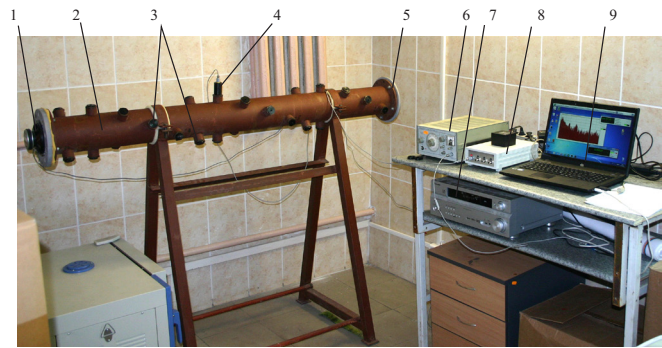


Рис. 3: Внешний вид экспериментального стенда

в трубе возбуждаются вынужденные упругие колебания, с другой — жесткой торцевой крышкой (5). Усилитель сигнала и генератор электрических сигналов (6, 7) позволяют моделировать в трубе звуковые колебания с заданной амплитудой и частотой, или же определенного спектрального состава. Измерения проводятся у каждого перфорационного отверстия с помощью микрофона (9) и анализатора спектра (8). Система измерений (4, 8, 9) обеспечивает регистрацию и сбор данных от микрофона, расположенных вблизи перфорационных отверстий.

Эксперименты проводились для двух случаев генерации вынужденных колебаний. В первом случае, с помощью генератора на динамическую головку подавался гармонический сигнал, частота которого менялась вручную. Во втором — подавался «белый шум». Результаты исследования показали, что второй вариант позволяет значительно сократить время проведения эксперимента, при этом экспериментальные данные практически совпадают. На рис. 4 представлена типичная кривая зависимости распределения амплитуды упругих колебаний от частоты. Характер полученной зависимости подтверждается опубликованными данными в работе [10].

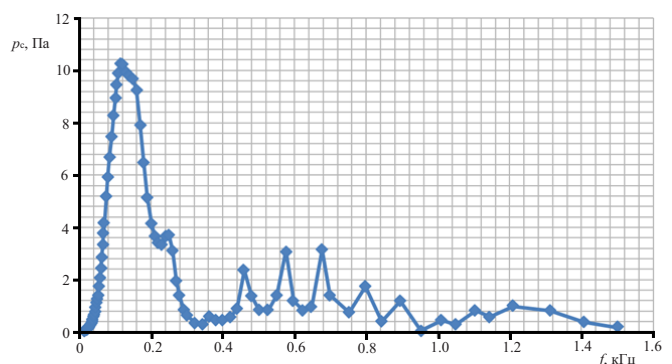


Рис. 4: Зависимость распределения амплитуды упругих колебаний от частоты вынужденных колебаний

Проведенные экспериментальные исследования в каждом перфорационном отверстии, позволили получить спектральную картину пространственного



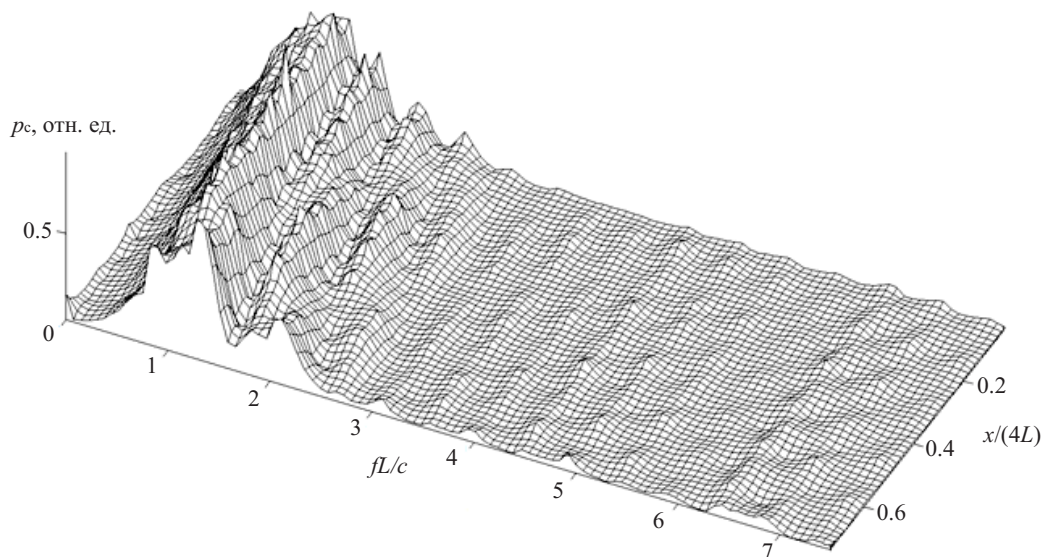


Рис. 5: Спектральная характеристика перфорированной трубы

распределения по длине трубы (рис. 5). Полученные пространственные распределения представляют собой волновые картины с интерференционными максимумами и минимумами. Установлено, что в области высоких частот наблюдается монотонное и существенное уменьшение интенсивности колебаний с ростом расстояния от источника. В области низких частот помимо максимумов, соответствующих собственным колебаниям для трубы, наблюдается составляющая спектра, амплитуда которой практически не меняется по длине трубы и соответствует резонансу, обусловленному перфорационными отверстиями. Абсолютные значения частоты этой составляющей соответствует расчетным данным, полученным по формуле (24).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы получена формула для определения частоты собственных колебаний пер-

форированной трубы, которая подтверждается экспериментально. Установлено, что кратное увеличение относительной амплитуды колебаний наблюдается в резонансной области, т. е. при совпадении частоты вынужденных колебаний с какой-либо собственной частотой трубы возникают резонансные явления. Показано, что наиболее эффективен режим воздействия на первых трех гармониках. Таким образом, для обеспечения условий резонанса и максимального снижения потерь энергии колебаний при распространении волн из скважины в пласт необходимо выбирать относительно небольших значения частот воздействия на пласт.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан (грант №13-08-97078).

- [1] Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шарифуллин Р.Я., Туфанов И.А. Повышение продуктивности и реанимации скважин с применением виброволнового воздействия. (М.: ООО «Недра - Бизнесцентр», 2000). 192 с.
- [2] Кузнецов О.Л., Симкин Э.М., Чилингар Дж. Физические основы вибрационного и акустического воздействия на нефтегазовые пласты. (М.: Мир, 2001). 260 с.
- [3] Гатауллин Р.Н., Кравцов Я.И., Марфин Е.А. Нефтяное хозяйство. № 1. С. 90-93. (2013).
- [4] Марфин Е.А., Кравцов Я.И. Известия Российской академии наук. Энергетика. № 6. С. 108. (2005).
- [5] Кравцов Я.И., Буторин Э.А., Марфин Е.А. Известия Российской академии наук. Энергетика. № 5. С. 92. (2008).
- [6] Гатауллин Р.Н., Кравцов Я.И., Коханова С.Я. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. № 3. С. 9. (2008).
- [7] Морз Ф. Колебания и звук. (М.: ГИТТЛ, 1949). 456 с.
- [8] Татур Т.А., Татур В.Е. Анализ электрических цепей. Часть 1. Установившиеся процессы в электрических цепях. (М.: Издательство МЭИ, 1994). 184 с.
- [9] Лепендин Л.Ф. Акустика: Учеб. пособие для втузов. (М.: Высш. школа, 1978). 448 с.
- [10] Гатауллин Р.Н., Кравцов Я.И., Марфин Е.А. Труды Академэнерго. № 4. С. 84. (2009).

**Sound propagation in a perforated well****D. R. Safiullin<sup>1,a</sup>, E. A. Marfin<sup>2,b</sup>, A. R. Zagidullina<sup>2,c</sup>**<sup>1</sup>*Institute of Physics, Kazan Federal University, Kazan 420111, Russia*<sup>2</sup>*Research Center for Power Engineering Problems of the Kazan Science Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan 420111, Russia**E-mail: <sup>a</sup> dinar\_safiullin@mail.ru, <sup>b</sup> marfin\_ea@mail.ru, <sup>c</sup> zagidullina\_aliy@mail.ru*

Work is directed on increase of efficiency of acoustic influence on well bottom zone for increase in oil recovery of a layer. On the basis of the researches spent by authors it is shown that the account of features of distribution of sound fluctuations in the punched chink and a choice of a mode of acoustic influence allows to reduce losses of energy of elastic waves considerably. Processes of distribution of elastic fluctuations in a chink and their transfers through punched apertures in environment are investigated. Settlement formulas for definition of frequency of own fluctuations and good quality in the punched pipe are received. Conditions of maintenance of a resonant mode are defined.

PACS: 43.20.Bi, 43.28.Py

Keywords: well, perforation, natural oscillations, attenuation, resonance, forced oscillations, quality factor.

Received 15.11.2014.

**Сведения об авторах**

1. Сафиуллин Динар Рифьянович — студент; тел.: +7 (960) 047-68-52, e-mail: dinar\_safiullin@mail.ru.
2. Марфин Евгений Александрович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; тел.: (843) 292-75-05, e-mail: marfin\_ea@mail.ru.
3. Загидуллина Алия Ринатовна — младший научный сотрудник; тел.: (843) 292-75-05, e-mail: zagidullina\_aliy@mail.ru.