

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРФОРАЦИИ СКВАЖИНЫ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Хусаинов И.Г.

Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», Республика Башкортостан, (453103, г. Стерлитамак, Проспект Ленина, 49), e-mail: ivt30@mail.ru.

Геофизические исследования действующих эксплуатационных или вновь вводимых скважин являются основными источниками информации для изучения, контроля и оптимизации процессов разработки нефтяных и газовых месторождений. В работе для определения качества перфорации предлагается использовать акустические методы, связанные с особенностями эволюции волн, распространяющихся по жидкости внутри перфорированной скважины. Исследуются зависимости коэффициента затухания и фазовой скорости гармонической волны в перфорированном участке от длины перфорационного канала. Для описания движения жидкости в перфорированном участке скважины используются уравнения неразрывности и импульса. Скорость утечки жидкости из скважины в перфорационные каналы определяется с помощью уравнения сохранения массы жидкости внутри перфорационного канала. На основе решения внешней фильтрационной задачи определяется скорость фильтрации флюида через стенки перфорационного канала, а поле давления вокруг перфорационного канала описывается уравнением пьезопроводности.

Ключевые слова: акустическая волна, перфорированная скважина, перфорационные каналы.

ESTIMATION OF QUALITY PERFORATION OF THE WELL BY ACOUSTIC METHOD

Khusainov I. G.

FGBOU VPO'S Sterlitamak branch "Bashkir state university", Republic of Bashkortostan, (453103, Sterlitamak, Lenin Avenue, 49), e-mail: ivt30@mail.ru.

Geophysical investigations of wells in operation or under commissioning are the main source of information for studying, controlling, and optimizing the processes of development of oil and gas deposits. In paper for definition of quality perforation it is offered to use the acoustic methods connected with features of evolution of waves, extending on liquids inside of perforated of the well. Dependences of factor of attenuation and phase speed of a harmonious wave in the perforated segment from length of perforation tunnels are researched. For the description of movement of a liquid of a perforated segment of the well the equations of indissolubility and an impulse are used. Speed of outflow of a liquid from well to perforation tunnels is determined by means of the equation of preservation of weight of a liquid inside of the perforation tunnels. On the basis of the decision of an external filtrational problem speed of a filtration of a fluid through walls of the perforation tunnels is defined, and the field of pressure around of the perforation tunnels is described by the equation of piezoconduction.

Key words: acoustic sounding, perforated wellbore, perforating tunnels.

Введение. Перфорация скважин широко применяется и для дополнительного вскрытия пластов (дострелов) в целях восстановления или повышения добычи, при переходе на эксплуатацию вышележащих горизонтов, а также при солянокислотной обработке и другим методам воздействия на прискважинную зону. Качественное вскрытие пластов перфорацией имеет важное, а подчас решающее значение для правильной оценки продуктивности разведочных скважин и осуществления максимально возможной отдачи продуктивных пластов, сокращения сроков сооружения и освоения скважин, эффективного использования скважины в течение долгих лет ее эксплуатации [3].

После вскрытия пласта возникает задача определения качества перфорации. Представляется, что одним из эффективных способов оперативного контроля качества вскрытия пласта перфорацией (оценка длины перфорационных каналов) могут быть акустические методы, связанные с особенностями эволюции волн, распространяющихся по жидкости внутри перфорированной скважины [4, 7, 11].

В [9, 14] волновой метод используется для оценки коллекторских характеристик призабойной зоны временно остановленных нефтяных и газовых скважин. Использование волн с целью очистки и исследования призабойной зоны нефтяных скважин рассмотрено в [1, 5, 6, 12, 15, 16]. Процесс распространения одномерных монохроматических волн в пористой среде, насыщенной газом, исследуется в [2, 8, 10, 13].

В работе исследовано распространение гармонических волн в перфорированном и непроницаемом (не перфорированном) участках заполненной жидкостью и окруженной проницаемой пористой средой скважины. Изучено влияние коллекторских характеристик пористой среды окружающей скважину и длины перфорационных каналов на эволюцию гармонических волн, распространяющихся в перфорированном участке скважины.

1. Основные уравнения. Рассмотрим перфорированную скважину, окруженную насыщенной жидкостью проницаемой пористой средой. Для описания распространения гармонических волн в перфорированном участке скважины примем следующие допущения: образовавшиеся перфорационные каналы на поверхности скважины расположены равномерно с плотностью n на единицу площади и имеют одинаковые длину l и радиус b .

Будем полагать, что волна распространяется вдоль оси скважины, а длина волновых возмущений λ значительно меньше длины перфорированного участка L и больше радиуса скважины a , а также больше расстояния между двумя соседними перфорационными каналами.

Пусть в сечении скважины на границе раздела участков с непроницаемыми (первая зона) и перфорированными (вторая зона) стенками длиной H и L соответственно акустические свойства системы изменяются скачкообразно. Ось z расположена параллельно оси скважины, при этом граница раздела находится в сечении с координатой $z = 0$.

В рамках модели плоского движения нестационарное течение жидкости в скважине при распространении возмущений будем описывать в квазиодномерном приближении. В первой зоне возмущение давления и скорость жидкости удовлетворяют уравнениям неразрывности и импульсов:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{2\tau}{a}. \quad (2)$$

Здесь p, ρ – возмущения давления и плотности жидкости соответственно, τ – вязкое напряжение на внутренней поверхности стенки скважины.

Для перфорированного участка скважины (вторая зона) уравнения неразрывности и импульса имеют вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{2n\pi b^2}{a} \rho_0 u, \quad (3)$$

$$\rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Здесь u – скорость утечки (или притока) жидкости из скважины в перфорационные каналы. Так как во второй зоне эволюция волны в основном определяется эффектами фильтрации жидкости из перфорационных каналов в окружающее пористое пространство, то в уравнении импульса действием вязкостных напряжений можно пренебрегать. Правая часть уравнения неразрывности описывает процесс утечки (или притока) жидкости из скважины через перфорационные каналы при распространении волн.

Для определения скорости u запишем уравнение сохранения массы жидкости внутри перфорационного канала:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\rho_0}{l} u - 2 \frac{\rho_0}{b} v. \quad (5)$$

На основе решения внешней фильтрационной задачи определим скорость фильтрации флюида через стенки перфорационного канала v . Для определения поля давления вокруг перфорационного канала используем уравнение пьезопроводности:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = \chi \frac{1}{r'} \frac{\partial}{\partial r'} \left(r' \frac{\partial p'}{\partial r'} \right), \quad \left(\chi = \frac{kC^2 \rho_0}{\mu t} \right). \quad (6)$$

Здесь μ – вязкость жидкости; m, k – коэффициенты пористости и проницаемости окружающей скважины пористой среды соответственно; χ – коэффициент пьезопроводности; p' – распределение давления вокруг канала; r' – радиальная координата.

Фильтрацию жидкости из перфорационных каналов в окружающую пористую среду опишем

с помощью закона Дарси:

$$v' = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p'}{\partial r'}, \quad (7)$$

где v' – распределение скорости фильтрации жидкости вокруг перфорационного канала.

Используя условие непрерывности скорости и давления на границе $r' = b$, для уравнений (6), (7) запишем следующие граничные условия:

$$v' = v, \quad p' = p, \quad (r' = b). \quad (8)$$

Для второго граничного условия для уравнения пьезопроводности (6) рассмотрим два предельных случая: а) глубина проникания волн давления r'_0 меньше среднего расстояния между соседними перфорационными каналами r_* , и, следовательно, фильтрационные потоки жидкости из двух соседних перфорационных каналов слабо взаимодействуют между собой; б) величина r'_0 сравнима с величиной r_* или превышает ее. Будем полагать, что вокруг соседних перфорационных каналов имеются одинаковые поля давления, и фильтрация жидкости через границу между соседними перфорационными каналами отсутствует. Для этих случаев граничные условия можно записать в виде:

$$p' = 0, \quad (r' = \infty) \quad (9 \text{ а})$$

или

$$\frac{\partial p'}{\partial r'} = 0, \quad (r' = r_*). \quad (9 \text{ б})$$

В качестве величины r_* примем половину среднего расстояния между основаниями перфорационных каналов на поверхности скважины.

Уравнение состояния жидкости запишем в виде:

$$p = C^2 \rho. \quad (10)$$

Здесь C – скорость звука в жидкости.

2. Распространение гармонических волн в перфорированном участке. Пусть гармоническая волна падает по направлению нормали к плоской границе раздела. Тогда движение в непроницаемой зоне определяется наложением двух волн: падающей и отраженной. В перфорированной зоне имеется только прошедшая волна. Для описания распространения этих волн получены волновые числа для непроницаемой (первой) и перфорированной (второй) зон.

Для непроницаемой зоны волновое число имеет вид:

$$K = \frac{\omega \sqrt{1 + 2y_v^{-1}}}{C}, \quad y_v = \sqrt{-i\omega a^2 / \nu}, \quad (11)$$

а для перфорированного участка

$$K_p = \frac{\omega}{C} \sqrt{1 + \frac{2\pi n b^2 l}{a} - i \frac{4\pi n l C^2 k y}{\omega \nu a}} \Psi(y). \quad (12)$$

Здесь $\nu = \mu / \rho_0$ – кинематическая вязкость жидкости. В зависимости от граничных условий (9 а) и (9 б) функция $\Psi(y)$ определяется соответственно по формулам:

$$\Psi(y) = -\frac{K_1(y)}{K_0(y)}, \quad (13 \text{ а})$$

$$\Psi(y) = \frac{K_1(y_*) I_1(y) - I_1(y_*) K_1(y)}{K_1(y_*) I_0(y) + I_1(y_*) K_0(y)}. \quad (13 \text{ б})$$

Здесь $K_\theta(y)$ – функция Макдональда, $I_\theta(y)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода порядка θ .

Из выражения (12) следует, что волновое число зависит от параметров скважины, жидкости, а также от величин b , l , n , определяющих качество вскрытия пласта перфорацией. При этом радиус перфорационных каналов определяется размером пуль, а их плотность – типом перфоратора [3]. Следовательно, неизвестной величиной, от которой зависит качество вскрытия, является длина перфорационных каналов l .

Фазовая скорость C_p и коэффициент затухания δ волн давления определяются по формулам $C_p = \omega / \text{Re}(K_p)$, $\delta = \text{Im}(K_p)$. На рис. 1, 2 показаны зависимости фазовой скорости C_p и коэффициента затухания δ акустических возмущений от частоты для перфорированного участка скважины, окруженного проницаемой пористой средой. При низких частотах ($\omega < 10^3 \text{ с}^{-1}$), как коэффициент затухания, так и фазовая скорость, полученные с использованием граничных условиях (9 а), (9 б), значительно отличаются друг от друга. Сравнение линий 1 и 2 показывает, что увеличение длины перфорационного канала l в три раза приводит к аналогичному увеличению коэффициента затухания.

Для высокочастотных волн ($\omega \geq 10^3 \text{ с}^{-1}$) глубина проникания волн меньше чем r_* , поэтому результаты, полученные при граничных условиях (9 а), (9 б), практически совпадают.

Также видно, что с уменьшением коэффициента проницаемости пористой среды уменьшается также коэффициент затухания.

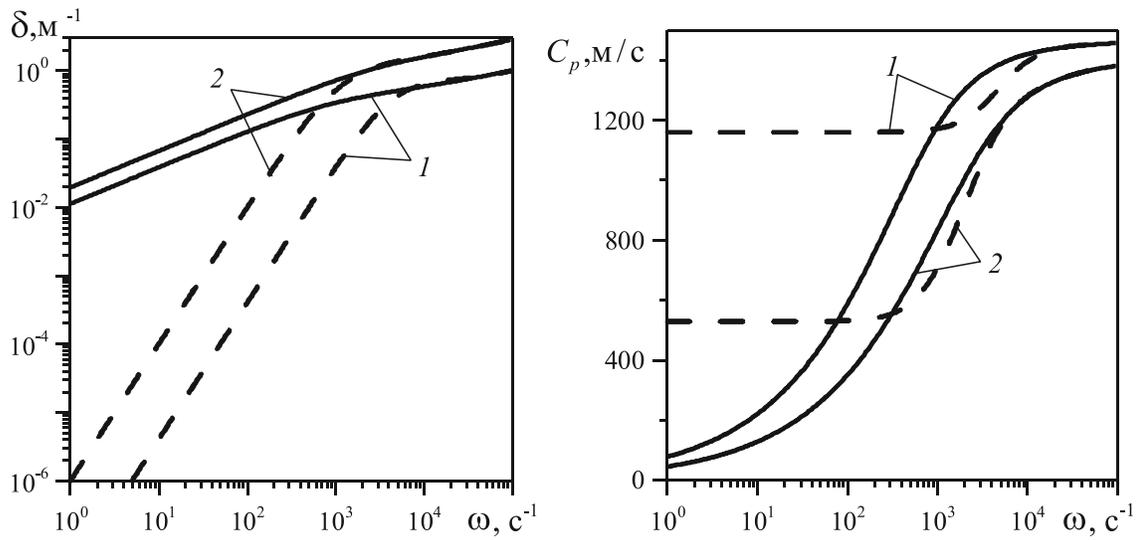


Рис. 1. Влияние длины перфорационного канала (1 – $l = 0.1\text{ м}$, 2 – $l = 0.3\text{ м}$) на коэффициент затухания δ и фазовую скорость C_p в перфорированном участке скважины, окруженной высокопроницаемой пористой средой ($k = 10\overline{\text{М}}^{-12}$). Сплошные линии соответствуют решению с использованием граничного условия (9 а), а штриховые – с использованием граничного условия (9 б)

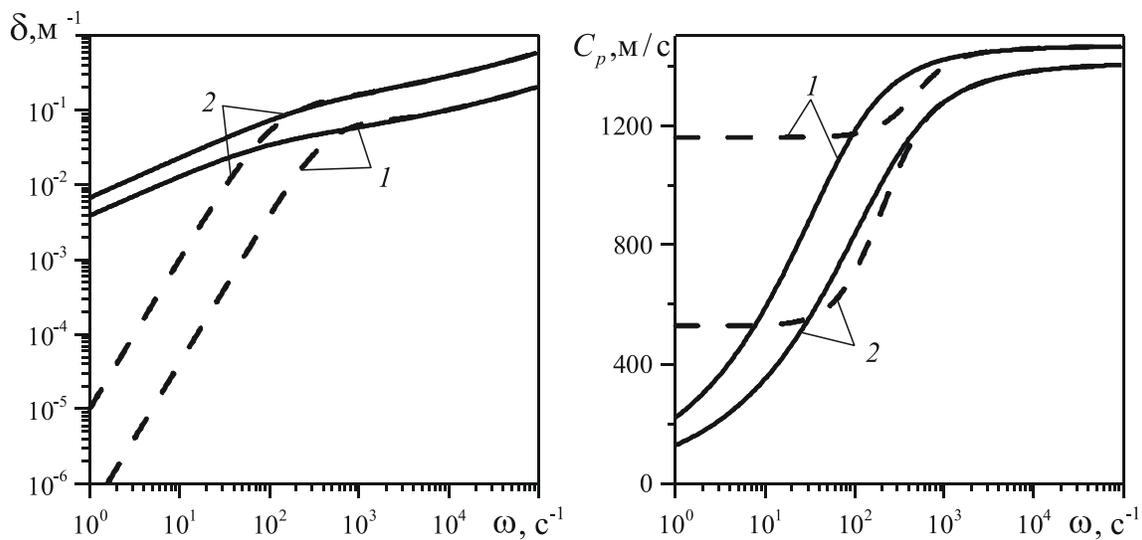


Рис. 2. Зависимости коэффициента затухания и фазовой скорости возмущений от частоты в перфорированном участке скважины, окруженной низкопроницаемой пористой средой ($k = 10\overline{\text{М}}^{-3}$). Обозначения линий такие же, как на рис. 1

Вывод. Поскольку коэффициент затухания и фазовая скорость волны в перфорированном участке сильно зависят от длины перфорационного канала, от которой зависит качество вскрытия скважины перфорацией, то полученные результаты дают основание делать вывод о возможности использования акустического метода для экспресс-контроля качества вскрытия перфорацией скважины.

Работа выполнена при поддержке гранта СФ БашГУ № В14-19.

Список литературы

1. Ахатов И.Ш., Хасанов М.М., Хусаинов И.Г. Авто-и стохастические колебания в гидродинамике неньютоновских жидкостей // Прикладная математика и механика. – 1993. – Т. 57. – № 1. – С. 71.
2. Володин С.В., Дмитриев В.Л., Хусаинов И.Г. Распространение линейных волн во влажных насыщенных газом пористых средах // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47. – № 5. – С. 734-740.
3. Григорян Н. Г. Вскрытие нефтегазовых пластов стреляющими перфораторами. – М.: Недра, 1982. – 263 с.
4. Хусаинов И.Г. Акустическое зондирование перфорированных скважин короткими волнами // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т. 54. – № 1 (317). – С. 86-93.
5. Хусаинов И.Г. Исследование влияния структурных изменений на реологическое поведение неньютоновских систем: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Уфа: Башкирский государственный университет, 1992.
6. Хусаинов И.Г. Тепловые процессы при акустическом воздействии на насыщенную жидкостью пористую среду // Вестник Башкирского университета. – 2013. – Т. 18. – № 2. – С. 350-353.
7. Хусаинов И.Г. Отражение акустических волн в цилиндрическом канале от перфорированного участка // Прикладная математика и механика. – 2013. – Т. 77. – № 3. – С. 441-451.
8. Хусаинов И.Г., Дмитриев В.Л. Исследование эволюции волнового импульса при прохождении через пористую преграду // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52. – № 5 (309). – С. 136-145.
9. Хусаинов И.Г., Хусаинова Г.Я. Исследование параметров пласта методом опрессовки // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 706.

10. Хусаинов И.Г., Хусаинова Г.Я. Исследование распространения линейных волн в насыщенной газом пористой среде // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2014. – Т. 1. – № 06. – С. 94-97.
11. Хусаинов И.Г., Хусаинова Г.Я. Локальное акустическое зондирование скважины // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2014. – Т. 1. – № 06. – С. 8-10.
12. Хусаинова Г.Я., Хусаинов И.Г. Моделирование процесса очистки пористой среды растворителями // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. – 2014. – Т. 1. – № 06. – С. 91-94.
13. Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Дмитриев В.Л. Распространение линейных волн в насыщенных газом пористых средах с учетом межфазного теплообмена // Прикладная механика и техническая физика. – 2004. – Т. 45. – № 4 (266). – С. 114-120.
14. Шагапов В.Ш., Хусаинова Г.Я., Хусаинов И.Г., Хафизов Р.М. Релаксация давления в полости, окруженной пористой и проницаемой горной породой // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38. – № 3. – С. 106-112.
15. Akhatov I.S., Khasanov M.M., Khusainov I.G. Stability analysis for the movement of strings in thixotropic liquid // Инженерно-физический журнал. – 1994. – Т. 66. – № 4. – С. 405-411.
16. Shagapov V.Sh., Khusainov I.G., Yumaguzina A.G. Heating of a liquid-saturated porous medium by an acoustic field // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76. – № 1. – С. 11-16.

Рецензенты:

Мустафина С.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры математического моделирования, Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», Республика Башкортостан, г. Стерлитамак;

Михайлов П.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры алгебры, геометрии и методики обучения математике, Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», Республика Башкортостан, г. Стерлитамак.