

of explosion. Algorithms for solving these interconnected problems were also developed. The novelty of this approach lays in opportunity to study several natural and technological processes and, at the same time, to take into account their mutual influence.

Keywords: coupled process simulation, gas-dynamic phenomena, methods of gas-dynamic phenomena preventing.

Статья поступила в редакцию 11.10.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Минеевым С.П.

УДК 550.344.094.4:537.528:622.245.5

Смирнов А. П., канд. техн. наук
(ИИПТ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В ГОРНОЙ ПОРОДЕ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ В ЖИДКОСТИ

Смірнов О. П., канд. техн. наук
(ІПТ НАН України)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ В ГІРСЬКІЙ ПОРОДІ ХВИЛІ ТИСКУ, ЯКА ГЕНЕРУЄТЬСЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ РОЗРЯДОМ У РІДИНІ

Smirnov O. P., Ph.D. (Tech.)
(IPPT NAS of Ukraine)

THE STUDY OF PROPAGATION OF THE PRESSURE WAVE GENERATED BY ELECTRIC DISCHARGE IN THE FLUID IN THE ROCKS

Аннотация. В работе представлена методика расчета параметров волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости, в горной породе на заданном расстоянии от источника возмущения. С ее помощью, используя экспериментально полученный профиль волны давления, было выполнено численное исследование ее распространения в призабойной зоне скважины при электроразрядном способе декольматации. Результаты исследования показали, что при электроразрядном способе декольматации воздействию подвергается не только стенка скважины и перфорационные отверстия, но и ближайшая к стволу скважины часть призабойной зоны. Полученные результаты, несмотря на факт полного затухания волны давления в ближних районах призабойной зоны, позволяют сделать вывод о целесообразности применения электроразрядного воздействия для обработки нефтедобывающих скважин с целью повышения их дебита.

Ключевые слова: электрический разряд в жидкости, волна давления, коэффициент затухания, горная порода.

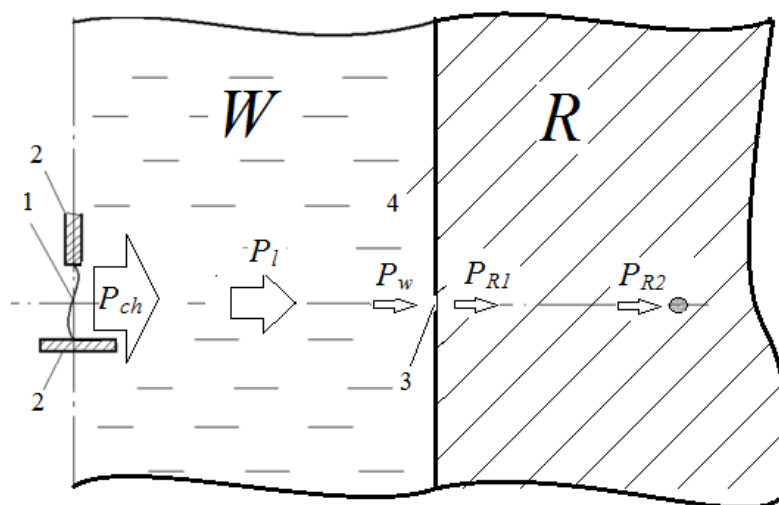
Введение

Электрический разряд в жидкости уже много лет эффективно применяется для декольматации добывающих скважин с целью увеличения их производительности [1-3].

В процессе электроразрядной обработки воздействию подвергается не только стенка скважины и ее перфорационные отверстия, но и ближайшая часть горной породы призабойной зоны скважины. В связи с этим работы, направленные на изучение распространения волны давления, генерируемой электрическим разрядом в скважинной жидкости, в горной породе призабойной зоны добывающих скважин, позволят более досконально изучить процессы, сопровождающие электроразрядный способ декольматации и повысить его эффективность. Поэтому целью данной работы было исследование распространения волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости, в горной породе призабойной зоны скважины.

Физическая сущность исследуемого процесса.

При электроразрядном способе декольматации волна давления, генерируемая электрическим разрядом, распространяется в пространстве скважины, падает на ее стенку и после отражения-преломления на границе раздела сред распространяется в горной породе (на рис. 1 приведена графическая схема распространения волны давления в скважине и призабойной зоне при электроразрядном способе декольматации). Физическая сущность исследуемых процессов заключается в следующем.



1 - канал разряда; 2 - электроды электродной системы; 3 - перфорационное отверстие;
4 - стенка обсадной колонны скважины;

P_{ch} - давление в канале разряда; P_l - давление в скважине; P_w - давление на стенке скважины;
 P_{R1} - начальное давление в горной породе; P_{R2} - давление в нужной точке горной породы;

W - пространство скважины; R - пространство горной породы

Рисунок 1 - Схема распространения волны давления в скважине и призабойной зоне при электроразрядном способе декольматации

На начальной стадии электрического разряда в воде [4] между электродами (2, рис. 1), под действием электрического напряжения, возникающего на них при подключении заряженного конденсатора, образуется плазменный канал разряда (1, рис. 1), замыкающий межэлектродный промежуток, после чего раз-

рядный ток разогревает плазму до температуры порядка 10^4 К. Разогрев плазмы вызывает повышение давления в канале разряда, что, в свою очередь, приводит к его расширению (давление в канале разряда может достигать 10^8 Па). Расширение канала сопровождается излучением волны сжатия в скважинную жидкость. Распространение волны давления сопровождается уменьшением ее амплитудного значения (основной причиной, вследствие малости пройденного расстояния и малого значения коэффициента поглощения жидкой среды скважины, является геометрическое расхождение сигнала).

При достижении волной давления стенки скважины (4, рис. 1) происходит ее отражение-преломление на границе раздела двух сред: она частично отражается, а остальная часть проходит в пространство горной породы. В результате этого возникают три волны: волна отражения от границы (распространяется в скважинной жидкости), проходящие продольные и поперечные волны (распространяются в горной породе). Значения коэффициентов отражения и прохождения волн давления зависят от волнового сопротивления (импедансов) сред. В случае обсаженных скважин основным "источником" волн давления в горной породе являются перфорационные отверстия (3, рис. 1). При этом, учитывая малость размера перфорационного отверстия по сравнению с размерами неперфорированной зоны обсадной колонны, начальное давление на входе в перфорационное отверстие и, соответственно, давление на входе в горную породу можно считать равным давлению на стенке скважины.

Как известно распространение волны давления в горной породе сопровождается постепенным уменьшением ее интенсивности по мере удаления от источника возмущения, что выражается в уменьшении ее амплитуды и изменении профиля. Это связано с геометрическим расхождением сигнала от источника, отражением на границах раздела сред (слоев горных пород) и поглощением (диссипацией) энергии волн в горных породах [5-7]. Поглощающие свойства горных пород при распространении в них волны давления характеризуются коэффициентом поглощения (затухания) α . Для всех пород он является возрастающей функцией частоты (ω). При этом зависимость $\alpha(\omega)$ для большинства горных пород может быть принята линейной [8, 9], то есть $\alpha(\omega) = \alpha_0 \omega$ (α_0 - коэффициент, характеризующий величину затухания в среде и не зависящий от частоты). Именно более быстрое затухание высокочастотных составляющих волны давления является одной из причин приводящих к изменению ее формы. Второй является дисперсия фазовой скорости. Однако, в силу малости своих значений дисперсия фазовой скорости не оказывает существенное влияние на изменение формы импульса, поэтому в дальнейшем ею можно будет пренебречь.

Расчетная методика определения параметров волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости, в горной породе

Исследованию распространения и затухания упругих волн в горных породах было посвящено множество работ [6, 10-15]. Согласно выполненному анализу литературных источников [8, 10, 11, 15-17] для определения параметров волн давления в горных породах на некотором расстоянии от разряда может

быть применен подход, в основе которого лежит теория спектрального анализа и синтеза. При его использовании сигнал возмущения (в нашем случае - волна давления на стенке скважины) разлагается на гармонические компоненты, определяется его амплитудный спектр. Затем, с учетом коэффициентов отражения и прохождения, а также с учетом затухания сигнала по мере его распространения в горной породе и геометрического расхождения, определяется новый амплитудный спектр сигнала в необходимой точке горной породы, по которому осуществляется синтез профиля волны давления.

На основании выбранного подхода расчета затухания волны давления в горной породе и анализа физической картины распространения волны давления при электроразрядном воздействии на призабойную зону скважины при построении расчетной методики были приняты следующие допущения:

- скважина заполнена идеальной жидкостью;
- размеры перфорационного отверстия малы по сравнению с размерами неперфорированной зоны обсадной колонны;
- электрический разряд является точечным источником волн давления;
- происходит нормальное падение волны давления на границу раздела "скважинная жидкость – горная порода": распространяются только продольные волны;
- массив горной породы принят сплошным и однородным по своим свойствам;
- при переходе "скважинная жидкость – горная порода" форма волны давления не меняется;
- коэффициент поглощения горной породы имеет линейную зависимость от частоты гармонических составляющих импульса;
- при распространении в горной породе дисперсия фазовой скорости не оказывает существенное влияние на изменение формы импульса [16, 17];
- решается одномерная задача, то есть рассматривается распространение волны давления в экваториальной плоскости разряда, где амплитуда волны давления максимальная.

Анализ физической сущности исследуемых процессов показал, что при разработке расчетной методики можно условно разделить ее на четыре шага: исследование процессов в канале разряда, его расширение; распространение волны давления в скважинной жидкости; отражение-преломление волн давления на границе двух сред: "скважинная жидкость - горная порода"; распространение волны давления в горной породе.

На первом и втором шаге рассчитывается профиль волны давления на стенке скважины. Для его определения можно воспользоваться тремя подходами: решение, с помощью численных методов, системы дифференциальных уравнений [18-20]; решение системы аналитических, эмпирических, полуэмпирических выражений [21, 22]; использовать профиль волны давления на стенке скважины, полученный в ходе экспериментальных исследований.

На третьем шаге рассматривается отражение – преломление волны давления на границе "скважинная жидкость - горная порода". Согласно принятым допу-

щениям рассматривается нормальное падение волны давления на стенку скважины. В этом случае при расчете коэффициента прохождения (K_r) при переходе вода - горная порода может быть использовано выражение [23]

$$K_r = \frac{2\rho_1 Z_2}{\rho_2(Z_1 + Z_2)}, \quad (1)$$

где ρ_1, ρ_2 - плотность скважинной жидкости и горной породы соответственно, кг/м³; c_1, c_2 - скорость звука в скважинной жидкости и горной породе соответственно, м/с; $Z_1 = \rho_1 c_1$ и $Z_2 = \rho_2 c_2$ - импеданс (волновое сопротивление) скважинной жидкости и горной породы соответственно.

Для рассмотрения распространения волны давления в горной породе, как уже было сказано выше, будет использован "спектральный подход". Ниже рассмотрим более подробно суть данного подхода. Исходный временной профиль волны давления в горной породе (P_{Rl} , рис. 1) разлагается на гармонические компоненты - то есть он представляется в виде конечного ряда Фурье и определяются коэффициенты Фурье (A, B).

Разложение на гармонические компоненты происходит по известному алгоритму [24, 25]. При этом мы представляем волну давления ($P(t)$) как периодическую функцию с периодом равным длительности импульса (T).

$$P(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (A_i \cos(2\pi f_1 t) + B_i \sin(2\pi f_1 t)), \quad (2)$$

где $f_1 = 1/T$ - частота первой гармоники, Гц; i - номер гармоники; A_0 - среднее значение сигнала.

Коэффициенты Фурье определяются выражениями

$$A_{i0} = \frac{2}{T} \int_0^T P(t) \cos(2\pi f_1 t) dt, \quad (3)$$

$$B_{i0} = \frac{2}{T} \int_0^T P(t) \sin(2\pi f_1 t) dt. \quad (4)$$

В процессе распространения волны давления в горной породе, происходит уменьшение коэффициентов Фурье. Зная коэффициент поглощения среды и пройденное расстояние (r) в горной породе, вычисляются новые значения коэффициентов Фурье

$$A_{ir} = A_{i0} R K_r e^{-\alpha(\omega)r}, \quad (5)$$

$$B_{ir} = B_{i0} R K_r e^{-\alpha(\omega)r}, \quad (6)$$

где A_{ir} , B_{ir} - коэффициенты Фурье трансформирующейся волны давления, Па·с; A_{i0} , B_{i0} - коэффициенты Фурье исходной волны давления, Па·с; R - коэффициент геометрического расхождения; r - расстояние от стенки скважины до точки в горной породе, где необходимо определить параметры волны давления, м; $\alpha(\omega)$ - коэффициент поглощения для гармоники с частотой ω , м⁻¹; ω - угловая частота, рад/с.

Когда источником волн давления в скважине является электрический разряд, то для расчета геометрического расхождения сигнала может быть применена схема, представленная на рис. 2.

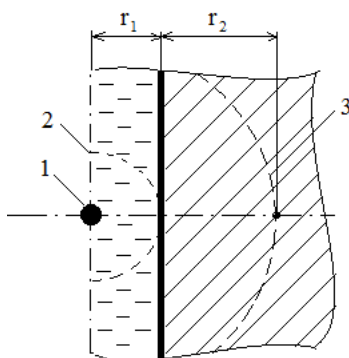


Рисунок 2 - Расчетная схема геометрического расхождения волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости

Предполагаем, что электрический разряд в скважине (1) представляет собой точечный источник распространения сферических волн давления в скважинной жидкости (2) и горной породе (3).

Согласно [26], зная начальное давление в горной породе (P_{R1} , рис. 1), расстояние от разряда до стенки скважины (r_1) можно определить величину давления в горной породе (P_{R2} , рис. 1) на заданном расстоянии (r_2) по

выражению (без учета поглощения сигнала горной породой)

$$P_{R2} = P_{R1} / ((r_2 + r_1) / r_1) \quad (7)$$

Аналогично выражению (7) будет определен коэффициент геометрического расхождения (R) в выражениях (5-6).

Используя новые полученные расчетные коэффициенты Фурье (A_{ir} , B_{ir}), с помощью обратного преобразования Фурье осуществляется синтез волны давления в требуемой точке горной породы. При этом будет использоваться подход с линейной интерполяцией функции $P(t)$ между узлами [27]. Данный подход позволяет получить синтезированную функцию при минимальном влиянии эффекта Гиббса, то есть избавиться от характерных колебаний синтезированной функции в районе разрывов исходной функции.

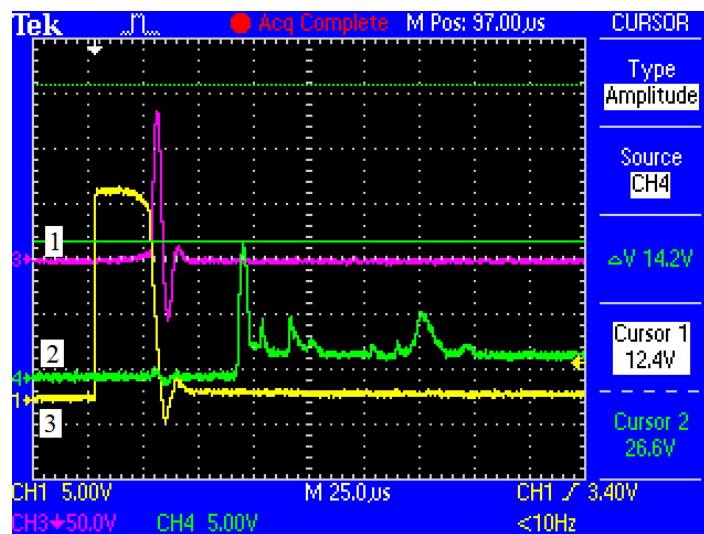
Исследование распространения волн давления, генерируемых электрическим разрядом в жидкости, в горных породах

С помощью разработанной расчетной методики было выполнено исследование параметров волн давления в горных породах на заданном расстоянии от разряда.

В качестве исходного сигнала был взят измеренный на специальном мало-

индуктивном (менее 1 мкГн) экспериментальном стенде [28], моделирующем внутрискважинные условия, профиль волны давления на стенке экспериментальной камеры на расстоянии 0,06 м от источника возмущения при гидростатическом давлении 2 МПа.

Данный импульс соответствует волне давления на стенке скважины, генерируемой электрическим разрядом в скважине в процессе работы электроразрядного скважинного устройства "Скиф-100М" [2, 29] при условиях идентичных экспериментальным. На рис. 3 приведена осциллограмма волны давления, а на рис. 4 - ее оцифрованный временной профиль.



1 - разрядный ток; 2 генерируемая волна давления;
3 - напряжение на разрядном промежутке

Рисунок 3 - Осциллограмма волны давления и сопутствующих электрических процессов при электрическом разряде в жидкости

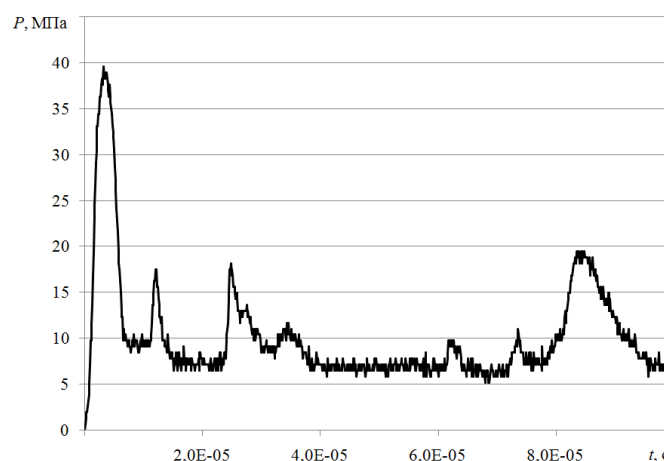


Рисунок 4 - Оцифрованный временной профиль волны давления на стенке экспериментальной камеры, генерируемой электроразрядным погружным устройством "Скиф-100М"

Рассматривалась волна давления длительностью 100 мкс, что позволяет исследовать распространение не только первичного импульса давления, но и целого ряда отраженных от элементов электродной системы волн.

Одним из типов пород-коллекторов нефтяных месторождений являются карбонатные породы [30]. Поэтому в рамках данной работы проводился расчет распространения волны давления в карбонатных породах со следующими параметрами: $\rho_2=2300$ кг/м³; $c_2=3000$ м/с; $Z_2=6,9 \cdot 10^6$ кг/(м²с); $\alpha_0=1 \cdot 10^{-6}$ с/м [8]. Считалось, что скважина заполнена водой: $\rho_1=1000$ кг/м³; $c_1=1492$ м/с; $Z_1=1,492 \cdot 10^6$ кг/(м²с).

На рис. 5 показано затухание амплитуды волны давления по мере ее распространения в карбонатных породах (для удобства рассмотрения ось ординат приведена с логарифмической шкалой с основанием 10).

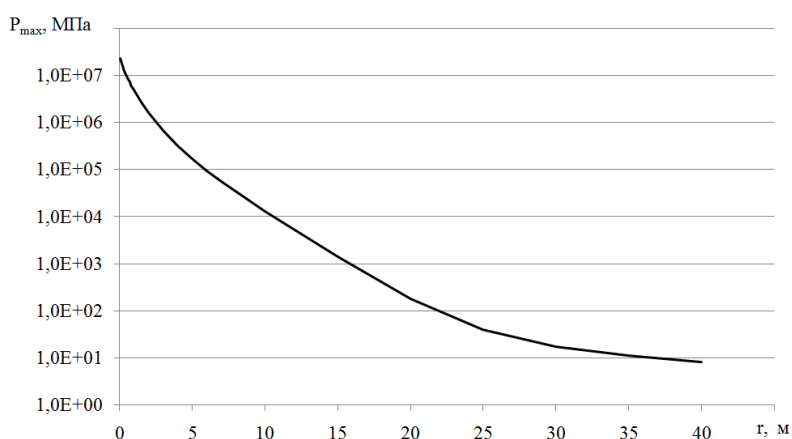
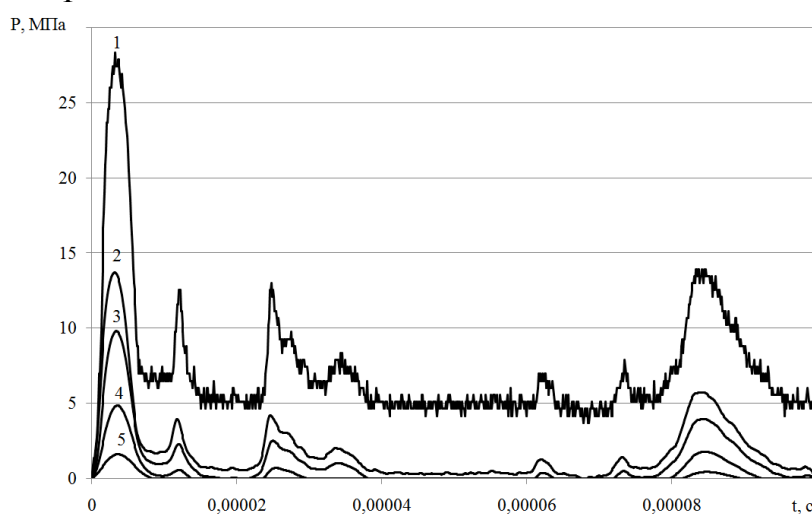


Рисунок 5 - Зависимость амплитуды волны давления в горной породе от расстояния до стенки скважины

Анализ рис. 5 показывает, что практически полное затухание возмущения происходит в ближних районах призабойной зоны (на расстоянии нескольких десятков метров).

На рис. 6 показана трансформация импульса давления при его распространении в горной породе.



1 - начальный профиль волны давления в горной породе; 2 - профиль волны давления на расстоянии 0,3 м от границы раздела скважинная жидкость горная порода;
3 - 0,5 м; 4 - 1 м; 5 - 2 м

Рисунок 6 - Трансформация волны давления при ее распространении в горной породе

Анализ представленных на рис. 6 результатов показал, что в процессе распространения волны давления в горных породах происходит ее трансформация, которая выражается в изменении ее амплитудных значений и временного профиля. Исходную волну давления (рис. 5) можно представить в виде комплекса волн: первичной волны давления, генерируемой электрическим разрядом в скважине, и ряда отраженных (например, от элементов электродной системы) волн. По мере распространения давления в горной породе "единый комплекс волн" преобразуется в ряд отдельно распространяющихся волн давления (рис. 5), которые, в конечном итоге, полностью затухают.

Выводы. Результаты выполненных исследований распространения волны давления, генерируемой электроразрядным погружным устройством "Скиф-100М" в горных породах (на примере карбонатных пород) показали, что при электроразрядном способе декольматации воздействию подвергается не только стенка скважины и перфорационные отверстия, но и ближайшие к стволу скважины районы призабойной зоны. Это подтверждает целесообразность применения электроразрядного способа декольматации для обработки нефтедобывающих скважин с целью повышения их дебита.

Автор выражает благодарность научным сотрудникам ИИПТ НАН Украины В. Г. Жекулу, С. Г. Поклонову и Э. И. Тафтаю за помощь в проведении экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Динамические способы декольматации поверхностных скважин / К. К. Софийский, П. Е. Филимонов, Б. В. Бокий [и др.]. - Донецк: ТОВ "Східний видавничий дім", 2014. - 248 с.
2. Анализ эффективности промышленного применения способа электроразрядного воздействия на призабойную зону скважины с целью интенсификации притока нефти / А. П. Смирнов, И.С. Швец, В. Г. Жекул [и др.] // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск, 2014. - Вып. 114. - С. 132 - 141.
3. Сизоненко, О. Н. Электроразрядный метод воздействия на структуру пористых материалов / О. Н. Сизоненко. - Киев: НПП "Интерсервис", 2015. - 300 с.
4. Наугольных, К. А. Электрические разряды в воде / К. А. Наугольных, Н. А. Рой. - Москва: Наука, 1971. - 155 с.
5. Бондарев, В.И. Основы сейсморазведки / В. И. Бондарев. - Екатеринбург: Издательство УГГГА, 2003. - 332 с.
6. Полак, Л. С. Ослабление и поглощение отраженных волн в осадочных породах / Л. С. Полак // Прикладная геофизика. - 1957. - №17. - С. 16-32.
7. Горбачев, Ю. И. Геофизические исследования скважин /Ю. И. Горбачев. - М.: Недра, 1990. - 398 с.
8. Владов, М. Л. Электроискровой источник упругих волн для целей наземной сейсморазведки / М. Л. Владов, А. В. Калинин, В. В. Калинин. - М.: Изд-во МГУ, 1989. - 193 с.
9. Авербух, А. Г. Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке / А. Г. Авербух. - Москва: Недра, 1982. - 232 с.
10. Zhang, Zimin. Seismic attenuation and rock property analysis / Zimin Zhang, Robert R. Stewart // CREWES Research Report. - 2007. - vol. 19. - P. 1-16.
11. Cheng, Peng. Complex spectral ratio method for Q estimation / Peng Cheng, Gary F. Margrave// CREWES Research Report — 2008. - vol. 20. - P. 1-9.
12. Carcione, Joser. P-wave seismic attenuation by slow-wave diffusion. Effects of inhomogeneous rock properties / Joser M. Carcione , Stefano Picotti // Geophysics. -2006. - №71 (3). - P. O1-O8.
13. Dvorkin, Jack. Seismic wave attenuation in a methane hydrate reservoir / Jack Dvorkin, Richard Uden // The Leading Edge. - 2004. - № 23(8). - P. 730-732.

14. Johnston, D. H. Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: II. Mechanisms / D.H. Johnston, M. N. Toksöz, and A. Timur // *Geophysics*. - 1979. - № 44(4). - P. 691-711.
15. Hauge, P. S. Measurements of attenuation from vertical seismic profiles / P. S. Hauge. - *Geophysics*. - 1981. - №46. - P.1548-1558.
16. Сейсморазведка: справочник геофизика / Под ред. И. И. Гурвича, В. П. Номоконова. - М.: Недра, 1981. - 464 с.
17. Булатова, Ж. М. Акустический каротаж / Ж. М. Булатова, Е. А. Волкова, Е. Ф. Дубров. - М.: Недра, 1970. - 264 с.
18. The Study of the Effect of the Electrodischarge Action Modes on Viscous Deposits in Cylindrical Channels/ A.P. Smirnov, V. M. Kosenkov, V. G. Zhekul [and etc.] // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2010. - Vol. 46, No. 3. – P. 237–242.
19. Барбашова, Г. А. Определение гидродинамической нагрузки на стенку нефтяной скважины, формируемой электрическим разрядом/ Г. А. Барбашова, В. М. Косенков // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2001. –№6. - Т. 42. – С. 93-97.
20. Электрические и гидродинамические характеристики разряда при импульсной обработке водяных скважин / В. Г. Жекул, Г. А. Барбашова, К. В. Дубовенко [и др.] // *Вестник НТУ "ХПИ": Сборник научных трудов*. Т.В.: Электроэнергетика и преобразовательная техника./ НТУ "ХПИ". – Харьков, 2004. –Вып.35. –С. 197-203.
21. Шамко, В.В. Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда / В.В. Шамко, В. В. Кучеренко. – Николаев: ИИПТ НАН Украины, 1991. – 52 с. – (Препринт / НАН Украины, Институт импульсных процессов и технологий; № 20).
22. Кривицкий, Е.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде / Е. В. Кривицкий, В.В. Шамко. - Киев: Наукова думка, 1979. - 208 с.
23. Лепендин, Л.Ф. Акустика / Л.Ф. Лепендин. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
24. Никитин, А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации / А. А. Никитин, А. В. Петров. - Москва: Изд-во РГГУ, 2008. - 112 с.
25. Дьяконов, В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ / В.П. Дьяконов. - Москва: Наука, 1987. - 240 с.
26. Артемьев, А. Е. Физические основы сейсморазведки / А. Е. Артемьев. - Саратов: ООО Издательский центр "Наука", 2012. - 56 с.
27. Дьяконов, В. П. Mathcad 8 PRO в математике, физике и Internet / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова. - М.: «Нолидж», 2000. — 512 с.
28. Poklonov, S. G. Technique and Results of Experimental Investigat of the Influence of the Elastic Barrier on Pressure Parameters in Electric Discharge in Water / S. G. Poklonov, V. G. Zhekul, A. P. Smirnov // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. - 2007. - Vol. 43, № 5. - P. 350-353.
29. Электроразрядная обработка скважин на нефтедобывающих месторождениях Украины / В. Г. Жекул, В. А. Кучернюк, Ю. И. Мельхер [и др.] // *Вестник НТУ "ХПИ": Сборник научных трудов*. Т.В.: Техника и электрофизика высоких напряжений./ НТУ "ХПИ". – Харьков, 2012. –Вып.21. –С. 72-77.
30. Киркинская, В. Н. Карбонатные породы - коллекторы нефти и газа / В. Н. Киркинская, Е.М. Смехов. - Ленинград: Недра, 1981. - 255 с.

REFERENCES

1. Sofiyskiy, K. K., Filimonov, P. E., Bokiy, B. V., Shvets, I. S., Cherednikov, V. V., Smirnov, A. P. and Agaev, R. A. (2014), *Dinamicheskie sposoby dekolmatatsii poverkhnostnykh skvazhin* [Dynamic methods of decolmatation of surface wells], Shidnij vidavnicij dim, Donetsk, Ukraine.
2. Smirnov, A. P., Shvets, I. S., Zhekul, V. G., Poklonov, S. G. and Kuchernyuk, V. A. (2014), "Efficiency of method of electrical discharge impact on the well-bottom zone for intensifying the oil inflow in terms of industrial application", *Geo-Technical Mechanics*, no. 114, pp.132-141.
3. Sizonenko, O. N. (2015), *Elektrozaryadnyu metod vozdeystviya na strukturu poristykh materialov* [Electrodischarge method impact on the structure of porous materials], Interservis, Kiev, Ukraine.
4. Naugolnyh, K. A. and Roy, N. A. (1971), *Elektricheskie razryady v vode* [Electrical discharges in water], Nauka, Moscow, Russia.
5. Bondarev, V. I. (2003), *Osnovy seysmorazvedki* [Basics seismic exploration], Publishing house UGGA, Yekaterinburg, Russia.

6. Polak, L. S. (1957), "Attenuation and absorption of the reflected waves in sedimentary rocks", *Prikladnaya geofizika* [Applied Geophysics], no. 17, pp. 16-32.
7. Gorbachev, Yu. I. (1990), *Geofizicheskie issledovaniya skvazhyn* [Geophysical researches of well], Nedra, Moscow, USSR.
8. Vladov, M. L., Kalinin, A. V. and Kalinin, V. V. (1989), *Elektroiskrovoy istochnik uprugikh voln dlya tseley nazemnoy seysmorazvedki* [Electric spark source of elastic waves for purposes land seismic exploration], Publishing house MGU, Moscow, USSR.
9. Averbukh, A. G. (1982), *Izucheniye sostava i svoystv gornykh porod pri seysmorazvedke* [The study of composition and properties of rocks at seismic exploration], Nedra, Moscow, USSR.
10. Zhang, Zimin and Stewart, Robert (2007), "Seismic attenuation and rock property analysis", *CREWES Research Report*, vol. 19, pp. 1-16.
11. Cheng, Peng and Margrave, Gary (2008), "Complex spectral ratio method for Q estimation", *CREWES Research Report*, vol. 20, pp. 1-9.
12. Carcione, Jose and Picotti, Stefano (2006), "P-wave seismic attenuation by slow-wave diffusion. Effects of inhomogeneous rock properties", *Geophysics*, no. 71(3), pp. O1-O8.
13. Dvorkin, Jack and Uden, Richard (2004), "Seismic wave attenuation in a methane hydrate reservoir", *The Leading Edge*, no. 23 (8), pp. 730-732.
14. Johnston, D. H., Toksöz, M. N., and Timur, A. (1979), "Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: II. Mechanisms", *Geophysics*, no. 44 (4), pp. 691-711.
15. Hauge, P. S. (1981), "Measurements of attenuation from vertical seismic profiles", *Geophysics*, no. 46, pp. 1548-1558.
16. Gurvich, I. I. and Nomokonov, V. P. (ed.) (1981), *Seysmorazvedka: spravochnik geofizika* [Seismic exploration: geophysics guide], Nedra, Moscow, USSR.
17. Bulatova, Zh. M. (1970), *Akusticheskiy karotazh* [Acoustic logging], Nedra, Moscow, Russia.
18. Smirnov, A. P., Kosenkov, V. M., Zhekul, V. G. and Poklonov, S. G. (2010), "The Study of the Effect of the Electrodischarge Action Modes on Viscous Deposits in Cylindrical Channels", *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, vol. 46, no. 3, pp.237-242.
19. Barbashova, G. A. and Kosenkov, V. M. (2001), "Determination of hydrodynamic load on the oil well wall formed by electric discharge", *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], vol. 42, no. 6, pp. 93-97.
20. Zhekul, V. G., Barbashova, G. A., Dubovenko, K. V., Smirnov, A. P. and Poklonov, S. G. (2004), "Electrical and hydrodynamic characteristics of the discharge pulse treatment of water wells", *Vestnik NTU «HPI». Sbornik nauchnykh robot. Seriya: Elektroenergetika i preobrazovatel'nayay tekhnika* [Bulletin of the national technical university "KhPI". Series: Power industry and conversion technics], no. 35, pp. 197-203.
21. Shamko, V. V. and Kucherenko, V. V. (1991), *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov energeticheskikh i gidrodinamicheskikh parametrov podvodnogo iskrovogo razryada* [Theoretical basis of engineering calculations of energy and hydrodynamic parameters of an underwater spark discharge], IPPT NAS of Ukraine, Nikolaev, Ukraine.
22. Krivitskiy, E. V. and Shamko, V. V. (1979), *Perekhodnye protsesy pri vysokovoltnom razryde v vode* [Transient processes with high voltage discharge in water], Naukova dumka, Kiev, USSR.
23. Lependin, L. F. (1978), *Akustika* [Acoustics], Vysshaya shkola, Moscow, USSR.
24. Nikitin, A. A. and Petrov, A. V. (2008), *Teoreticheskie osnovy obrabotki geofizicheskoy informatsii* [Theoretical basis of geophysical information processing], Publishing house RGGU, Moscow, Russia.
25. Dyakonov, V. P. (1987), *Spravochnik po algoritmam i programam na yazyke beysik dlya personalnykh EVM* [Handbook of algorithms and programs in the language BASIC for the personal computer], Nauka, Moscow, USSR.
26. Artemyev, A. E. (2012), *Fizicheskie osnovy seysmorazvedki* [Physical fundamentals of seismic exploration], OOO Izdatelskiy tsentr Nauka, Saratov, Russia.
27. Dyakonov, V. P. and Abramenkova, I. V. (2000), *Mathcad 8 PRO v matematike, fizike i Internet* [Mathcad 8 PRO in mathematics, physics and Internet], Nolidzh, Moscow, Russia.
28. Poklonov, S. G., Zhekul, V. G., Smirnov, A. P. (2007), "Technique and Results of Experimental Investigation of the Influence of the Elastic Barrier on Pressure Parameters in Electric Discharge in Water", *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, vol. 43, no. 5, pp. 350-353.
29. Zhekul, V. G., Kuchernyuk, V. A., Melkher Yu. I., Poklonov, S. G., Smirnov, A. P. and Shvets I. S. (2012), "Electrodischarge treatment of wells at oil fields of Ukraine", *Vestnik NTU «HPI». Sbornik nauch-*

nykh robot. Seriya: Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazheniy [Bulletin of the national technical university "KhPI". Series: Technique and Electrophysics of High Voltage], no. 21, pp. 72-77.

30. Kirkinskaya, V. N. and Smekhov, E. M. (1981), *Karbonatnyye porody - kollektory nefiti i gaza* [Carbonate rocks - reservoirs of oil and gas], Nedra, St. Petersburg, USSR.

Об авторе

Смирнов Алексей Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник в отделе импульсной обработки дисперсных систем, Институт импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, Украина, aps-78@mail.ru.

About the author

Smirnov Oleksiy Petrovych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher in Department of Pulse Treatment of Disperse Systems, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPPT, NASU), Mykolayiv, Ukraine, aps-78@mail.ru.

Анотація. У роботі представлена методика розрахунку параметрів хвилі тиску, що генерується електричним розрядом в рідині, в гірській породі на заданій відстані від джерела збудження. З її допомогою, використовуючи експериментально отриманий профіль хвилі тиску, було виконано чисельне дослідження її поширення в привибійній зоні свердловини при електророзрядному способі декольматації. Результати дослідження показали, що при електророзрядному способі декольматації впливу піддається не тільки стінка свердловини і перфораційні отвори, а й найближча до стовбура свердловини частина привибійної зони. Одержані результати, незважаючи на факт повного загасання хвилі тиску в ближніх районах привибійної зони, дозволяє зробити висновок про доцільність застосування електророзрядного впливу для обробки нафтовидобувних свердловин з метою підвищення їх дебіту.

Ключові слова: електричний розряд у рідині, хвиля тиску, коефіцієнт загасання, гірська порода.

Abstract. The work presents methods for calculation of parameters of the pressure wave generated by electrical discharge in the fluid in the rock at a given distance from the source of disturbance. With the help of these methods and experimentally obtained pressure wave profile, numerical study of the wave distribution in the face area of the well treated by the electric-discharge method of decolmatation was carried out. The results of the study showed that during the electric-discharge decolmatation not only the wall of the well and the perforations were affected, but also the bottom zone portion which was nearest to the well bore. Despite of the fact of complete attenuation of the pressure wave in areas nearest to the face area, the obtained results allow making a conclusion about expediency of the electric-discharge effect application for treating the oil wells in order to increase their flow rate.

Keywords: electric discharge in fluid, pressure wave, attenuation factor, rocks.

Статья поступила в редакцию 09.09.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Софийским К.К.