

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЯЗКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛАХ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, iipt@ipt.com.ua*

Введение

В процессе эксплуатации нефтяной скважины происходит кольматирование призабойной зоны (ПЗ) разного рода отложениями (вязкими, хрупкими), что снижает ее дебит. Для восстановления дебита скважины применяются различные методы декольматации, в основе которых лежат химическое, физическое или совокупное физико-химическое воздействие на кольматант [1]. Одним из наиболее перспективных физических методов воздействия является электроразрядный (электрогидроимпульсный) способ декольматации, разработанный в ИИПТ НАН Украины [2].

Ранее выполненные исследования электроразрядного способа декольматации [3, 4] были направлены на изучение гидродинамических процессов в скважине, исследование поведения матрицы пористой, насыщенной жидкостью среды при импульсном нагружении электрическим разрядом, изучение электроразрядного воздействия на хрупкие отложения и не рассматривалось поведение вязких отложений.

Исследование поведения вязкого кольматанта, загрязняющего пространство ПЗ скважины, при электроразрядном воздействии возможно с помощью математического или физического моделирования. Физическое моделирование процессов в скважинах требует значительных временных и материальных затрат, поэтому целесообразно применение математического моделирования.

В связи с этим **целью данной работы** являлось математическое моделирование поведения вязких отложений при электроразрядном (электрогидроимпульсном) воздействии и изучение влияния различных параметров электроразрядного устройства на эффективность его воздействия на вязкие отложения.

Математическая модель процесса

Математическая модель электроразрядного воздействия на вязкие отложения в щелях ПЗ (или перфорационных отверстиях) имеет блочную структуру и состоит из трех блоков. Первый блок модели описывает процессы в канале разряда, второй – процессы в скважинной жидкости и третий – процессы в вязкой жидкости пространства ПЗ скважины. При этом выходные данные одного блока модели являются начальными данными следующего блока модели.

При построении математической модели указанных процессов приняты следующие допущения:

- канал разряда в начальный момент времени имеет форму прямого кругового цилиндра, высота которого равна длине межэлектродного промежутка, а ось симметрии совпадает с осью симметрии скважины и погружной части комплекса;
- скважина заполнена идеальной жидкостью;
- стенка скважины абсолютно жесткая и неподвижная;
- на стенку скважины падает плоская волна давления;
- стенки перфорационного отверстия непроницаемые и неподвижные;
- перфорационное отверстие заполнено скважинной жидкостью и вязкими отложениями.

Уравнения первого блока (1)–(4), которые соответствуют модели, приведенной в [5], описывают процессы в зарядном контуре и в канале разряда:

$$L \frac{dI}{dt} + I(R_{KH} + R_{ш}) + q_3 / C = U_0, \quad (1)$$

где $I = dq_3 / dt$.

$$\frac{d(p_K S_K)}{dt} \frac{1}{\gamma - 1} + p_K \frac{dS_K}{dt} = I^2 R_{KH} \frac{1}{l}, \quad (2)$$

$$p_K = \frac{\rho_0}{2\pi} \frac{d^2 S_K}{dt^2} \ln \left(\frac{\pi^{0.5} l}{S_K^{0.5}} \right) - \frac{\rho_0}{8\pi S_K} \left(\frac{dS_K}{dt} \right)^2, \quad (3)$$

$$R_{KH} = \frac{Al(\gamma - 1)}{p_K S_K}. \quad (4)$$

В соотношениях (1)–(4): I – ток разряда, А; L – индуктивность электрической цепи, Гн; C – емкость конденсаторной батареи, Ф; U_0 – напряжение к началу канальной стадии, В; R_{KH} – сопротивление канала разряда, Ом; $R_{ш}$ – сопротивление шин разрядного контура, Ом; q_3 – электрический заряд, Кл; l – длина канала разряда, м; p_K – давление в канале, Па; S_K – площадь поперечного сечения канала разряда, м²; γ – эффективный показатель адиабаты Пуассона; ρ_0 – плотность покоящейся жидкости, кг/м³; A – искровая постоянная, В²·с·м⁻²; t – время, с.

Для описания гидродинамических процессов в скважине (второй блок математической модели), с учетом всех принятых допущений и размеров скважины, используется одномерное волновое уравнение (5) [6]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad (5)$$

где φ – потенциал скоростей движения жидкости, м²/с; r – пространственная координата, м; c_s – скорость звука в скважинной жидкости, м/с.

Для описания поведения вязких отложений (третий блок математической модели) используется система уравнений (6)–(9), состоящая из уравнения неразрывности (6) и уравнений движения вязкой жидкости (7), (8) [7]. Замыкается данная система уравнением состояния жидкости в форме Тэтта (9) [8].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0, \quad (6)$$

где $\text{div}(\rho V) = \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho V_r}{\partial r} + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z}$; ρ – плотность жидкости, кг/м³; r, z – пространственные координаты, м.

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} - \frac{V_r}{r^2} \right), \quad (7)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; P – давление в жидкости, Па.

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

$$P = B_c \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{k_c} - 1 \right) + P_0, \quad (9)$$

где ρ_0 – плотность невозмущенной жидкости, кг/м³; P_0 – давление невозмущенной жидкости, Па; B_c , k_c – параметры, характеризующие жидкую среду.

На контактной границе раздела скважинная жидкость–вязкое отложение ставилось условие равенства касательных напряжений со стороны вязкое отложение–граница раздела и скважинная жидкость–граница раздела (10). Данное условие позволяет с большей точностью исследовать процессы на границе раздела двух сред:

$$\tau_{cp} = \tau_{ep}, \quad (10)$$

где τ_{cp} – касательное напряжение в вязком отложении на границе раздела вязких сред, Па; τ_{ep} – касательное напряжение в скважинной жидкости на границе раздела вязких сред, Па.

Касательные напряжения определялись согласно выражению [9]:

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial V_r}{\partial y}, \quad (11)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; τ_{xy} – касательные напряжения, Па.

Верхняя, нижняя и противоположная входной границы приняты абсолютно жесткими, и на них ставятся условия непротекания и прилипания (12):

$$V_n = 0, V_\tau = 0, \quad (12)$$

где V_n – нормальная составляющая скорости жидкости, м/с; V_τ – тангенциальная составляющая скорости жидкости, м/с.

Система уравнений (1)–(4), описывающая процессы в канале разряда и в зарядной цепи, решалась конечно-разностным методом Эйлера-Коши [10]. Волновое уравнения (5) было решено с помощью схемы крест [11]. Для решения системы уравнений (6)–(9), которая описывает гидродинамические процессы в вязкой жидкости, использовался трехшаговый конечно-разностный метод [12]. Первые два шага выполняли по методу Эйлера-Коши. На третьем шаге осуществляли процедуру регуляризации решения уравнений (6)–(9) по методу Аббарбанеля и Цваса для устранения из него нефизических колебаний.

Расчет выполнялся с помощью программы, написанной на алгоритмическом языке Borland Delphi 7.0.

Исследование режимов электроразрядного воздействия на вязкие отложения

Ранее было выполнено тестирование данной математической модели и численного метода Эйлера-Коши-Аббарбанеля и Цваса [12], в результате которого сделан вывод, что ее можно использовать для исследования влияния различных технологических параметров электроразрядной обработки скважины на поведение вязких отложений в цилиндрических каналах.

При исследовании влияния режимов электроразрядного воздействия на поведение вязких отложений в перфорационных отверстиях ПЗ в качестве начальных данных зарядной цепи брались параметры, соответствующие параметрам электроразрядного скважинного устройства типа «Скиф» [13]:

- зарядное напряжение $U_0 = 30$ кВ;
- индуктивность разрядного контура $L = 0,7$ мкГн;
- емкость конденсаторной батареи $C = 2,1$ мкФ;
- сопротивление элементов разрядного контура без учета канала разряда $R_{кн} = 0,6$ Ом;
- длина межэлектродного промежутка $l = 0,02$ м.

Схема перфорационного канала ПЗ представлена на рис. 1. Канал заполнен двумя жидкими средами с различной вязкостью. На стенках отверстия находится равномерный слой вязких отложений (D_2 и D_3) с вязкостью μ_1 , между которыми располагается слой скважинной жидкости с вязкостью μ_2 , причем $D_1 = D_2 + D_3$ и $D_2 = D_3$. Также принято, что $\mu_1 \ll \mu_2$. В качестве первой модельной жидкости была выбрана вода ($\mu_1 = 0,00105$ Па·с), в качестве второй - вязкая среда с $\mu_2 = 80$ Па·с.

В результате выполненных расчетов первого блока математической модели получены временные профили разрядного тока и напряжения (рис. 2), а также давления в канале разряда (рис. 3, кривая 1). Результаты расчета второго блока математической модели представлены в виде графика давления на стенке скважины (рис. 3, кривая 2).

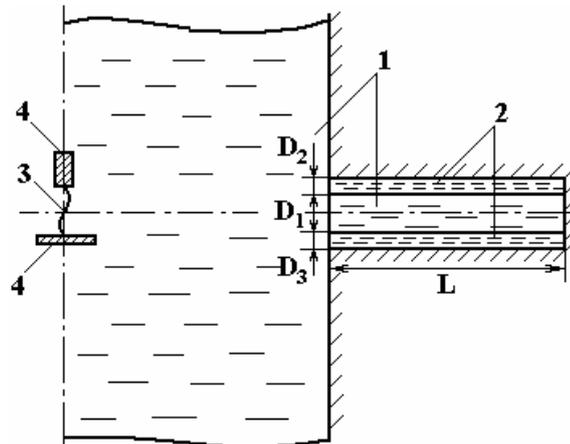


Рис. 1. Схема перфорационного канала цилиндрической формы: 1 – скважинная жидкость; 2 – вязкие отложения; 3 – канал разряда; 4 – электроды; L_n – длина поры, м; D_1 – цилиндрический слой скважинной жидкости, м; D_2, D_3 – цилиндрический слой вязких отложений, м

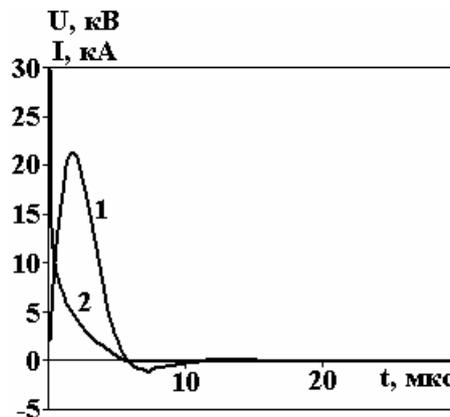


Рис. 2. Расчетные значения тока и напряжения: 1 – расчетный профиль тока; 2 – расчетный профиль напряжения

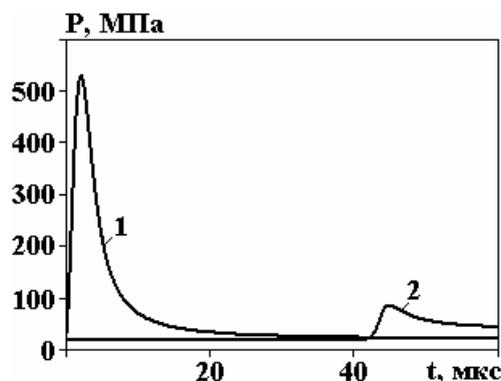


Рис. 3. Расчетные профили давления ($U_0 = 30$ кВ; $L = 0,7$ мкГн; $C = 2,1$ мкФ; $l = 0,02$ м): 1 – давление в канале разряда; 2 – первичная волна давления на стенке скважины на расстоянии $0,0635$ м от канала разряда

Для определения механизма электроразрядного воздействия на вязкие отложения были выполнены расчеты для перфорационного канала цилиндрической формы длиной 0,3 м и диаметром 0,012 м при гидростатическом давлении $P_{zc} = 0,1$ МПа, которое характерно для водозаборных скважин.

Анализ полученных данных показал, что под действием волны давления слой вязких отложений и скважинная жидкость приходят в движение с определенной скоростью (рис. 4). Движение вязкого слоя продолжается в период действия прямой и отраженных волн давления, после чего наступает быстрое затухание гидродинамических процессов в вязком слое и происходит его остановка. Вода продолжает свое движение более длительное время. Касательные напряжения, возникающие на границе раздела вода–вязкие отложения вследствие движения воды, значительно меньше предельных напряжений на сдвиг для вязкого материала (рис. 5), которые, например, для солидола лежат в пределах от 300 до 800 Па [14], а значит, в разрушении слоя вязких загрязнений этот процесс не участвует.

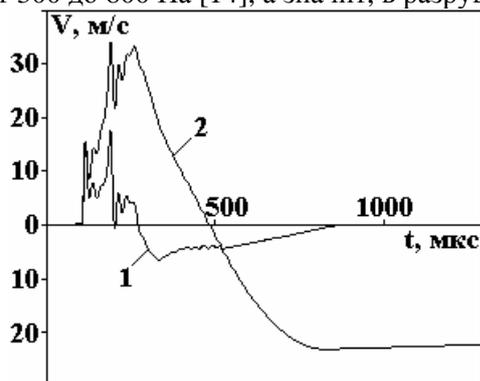


Рис. 4. Скорость движения жидкости при $P_{zc}=0,1$ МПа на расстоянии 0,05 м от входной границы перфорационного канала: 1 – скорость движения вязкого слоя; 2 – скорость движения воды

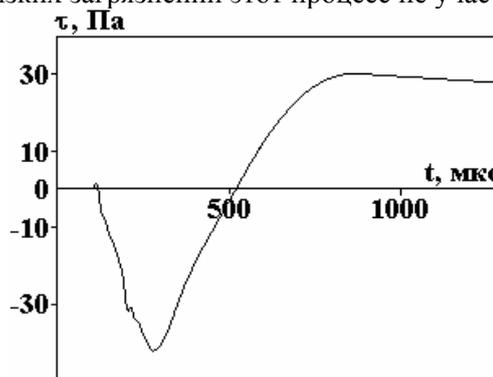


Рис. 5. Касательные напряжения, возникающие на границе раздела скважинная жидкость–вязкие отложения на расстоянии 0,05 м от входной границы перфорационного канала при $P_{zc} = 0,1$ МПа

Последующие расчеты, выполненные при $P_{zc}=20$ МПа (которое характерно для нефтяных скважин) для перфорационного канала цилиндрической формы длиной 0,1 м и диаметром 0,012 м, показали, что гидростатическое давление не оказывает существенного влияния на качественную картину процесса (см. рис. 6 и 7).

На рис. 6 приведены результаты расчетов для двух вариантов заполнения нефтяной скважины: 1 – заполнена маловязкой нефтью с $\mu_1=0,00872$ Па·с; 2 – заполнена водой с $\mu_1=0,00105$ Па·с. Анализ данного рисунка показывает, что при заполнении скважины маловязкой нефтью на границе раздела сред при движении жидкости возникают касательные напряжения, величина которых близка к критическому напряжению сдвига для вязкого вещества. Соответственно в этом случае возможны деформация и разрушение верхнего слоя отложений, вызванные движением скважинной жидкости.

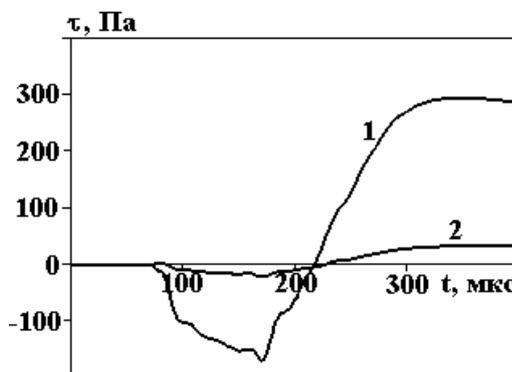


Рис. 6. Касательные напряжения на границе раздела скважинная жидкость–вязкие отложения на расстоянии 0,05 м от входной границы перфорационного канала, $P_{zc}=20$ МПа: 1 – скважинная жидкость с $\mu_1=0,00872$; 2 – скважинная жидкость с $\mu_1=0,00105$

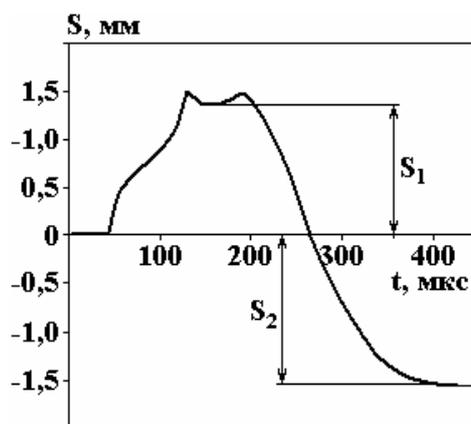


Рис. 7. Перемещение точки слоя вязких отложений на входной границе перфорационного канала при $P_{zc} = 20$ МПа

При исследовании влияния технологических режимов работы электроразрядного устройства на поведение вязких отложений в перфорационном канале для оценки эффективности воздействия было выбрано конечное перемещение точки на внешней границе вязких отложений (величины S_1 и S_2 – см. рис. 7). Выбор обусловлен тем, что перемещение учитывает как силы действия, вызванные волной давления, так и процессы, препятствующие движению (сила трения и соответственно возникшие касательные напряжения).

В расчетах учитывали, что потери энергии, запасенной в конденсаторной батарее, на пробой составляют 10%. Для всех технологических режимов была выбрана оптимальная длина межэлектродного промежутка [15]. В качестве первой модельной жидкости выбрана вода с $\mu_1 = 0,00105$ Па·с и параметрами, характеризующими среду, $B_{cp} = 304,6 \cdot 10^6$ и $\kappa_{cp} = 7,15$. Моделью вязких отложений служила модельная жидкость с вязкостью, равной вязкости солидола при нормальных условиях, $\mu_2 = 80$ Па·с. Параметр $\kappa_c = 11,015$ был принят согласно [16] как для высоковязкой нефти, а параметр $B_c = 131 \cdot 10^6$ определен согласно выражениям, представленным в [16].

Начальные данные и результаты исследования влияния технологических режимов электроразрядного устройства на вязкие отложения представлены в таблице.

В таблице приняты следующие обозначения: U_0 – начальное напряжение к моменту образования канала разряда, кВ; W – энергия разряда, Дж.

Параметры технологических режимов, представленных в таблице, подобраны так, чтобы можно было проследить их влияние на эффективность воздействия на вязкие отложения, определяемую величиной смещения относительно твердых стенок перфорационного отверстия. Из данных таблицы и рис. 8 видно, что эффективность воздействия определяется в основном энергией разряда. Так, увеличение энергии в два раза как за счет емкости накопительного конденсатора установки, так и за счет зарядного напряжения приводит примерно к одинаковому (до 25%) увеличению смещения вязкой среды отложений (режимы № 1, 2, 3, 4, 9).

Влияние режимов работы электроразрядного устройства на вязкие отложения

№ режима	U_0 , кВ	U_n , кВ	$R_{кн}$, Ом	L , мкГн	C , мкФ	l , м	W , Дж	S_1 , мм	S_2 , мм
1	30	28,5	0,6	0,7	2,1	0,02	850,5	1,138	1,273
2	30	28,5	0,6	0,7	4	0,0217	1620,0	1,378	1,53
3	25	23,7	0,6	0,7	2,1	0,0183	590,6	1,006	1,127
4	35	33,2	0,6	0,7	2,1	0,0216	1157,3	1,257	1,404
5	10	9,5	0,6	0,7	18,9	0,0152	850,5	1,005	1,121
6	35	33,2	0,6	0,7	1,543	0,0208	850,5	1,142	1,28
7	30	28,5	0,6	3,5	2,1	0,0245	850,5	1,089	1,212
8	30	28,5	0,15	0,7	2,1	0,02	850,5	1,446	1,612
9	41,425	39,3	0,6	0,7	2,1	0,0235	1620,0	1,402	1,562

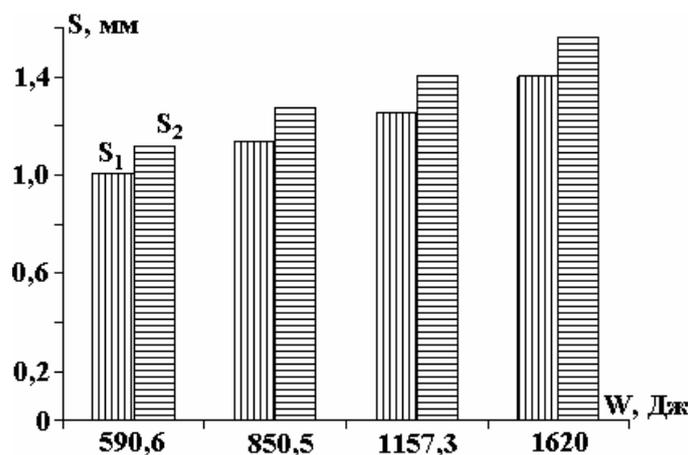


Рис. 8. Зависимость перемещений вязкого слоя от энергии разряда

Уменьшение сопротивления разрядной цепи установки в 4 раза (режим № 8), которое приводит к увеличению смещения вязких отложений на 27%, косвенно подтверждает влияние энергии, вводимой в канал искрового разряда, поскольку сопровождается уменьшением тепловых потерь в разрядном контуре и увеличением соответственно доли энергии, выделяемой в искровом канале разряда. Последнее сопровождается увеличением КПД преобразования запасенной электрической энергии установки в энергию акустической волны разряда.

Слабое влияние индуктивности разрядной цепи (режим № 7), определяющей период колебаний разрядного тока, а следовательно, и характер ввода энергии в канал разряда, на величину смещения вязких отложений подтверждает сделанный выше вывод, что эффективность воздействия определяется в основном величиной вводимой в разряд энергии.

Выводы

Анализ представленных в работе результатов расчета позволяет определить характер поведения вязких отложений в перфорационных отверстиях скважины при импульсном электроразрядном воздействии, а также влияние технологических параметров обработки на эффективность процессов очистки. По его результатам можно сделать следующие выводы:

- импульсное электроразрядное воздействие вызывает смещение слоя вязких отложений относительно стенки перфорационного отверстия скважины, что может стать причиной его очистки в процессе многократного нагружения (повторения разрядов);
- в процессе импульсного электроразрядного нагружения в слое вязких отложений, граничащих со скважинной жидкостью, возникают касательные напряжения, которые в случае превышения предельных сдвиговых напряжений для данного типа вязких отложений могут стать причиной их разрушения;
- эффективность электроразрядного воздействия на вязкие отложения зависит в основном от энергии разряда и КПД преобразования электрической энергии в энергию волны давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башкатов Д.Н., Драхлис С.Л., Сафонов В.В., Квашин Г.П. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду. М.: Недра, 1988. 268 с.
2. Гулый Г.А. Основы разрядноимпульсных технологий. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
3. Косенков В.М., Курашко Ю.И., Швец И.С. Влияние параметров электроразрядного воздействия на динамические и фильтрационные процессы при фильтровой зоне водозаборных скважин // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць: Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова НАНУ. Дніпропетровськ, 2002. В.35. С. 23–31.
4. Барбашова Г.А., Вовченко А.И., Каменская Л.А., Шамко В.В. Управление гидродинамическими процессами при электровзрывном программируемом многоимпульсном вводе энергии // Акустичний вісник. 2004. Т. 7. № 4. С. 3–9.
5. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
6. Лепендин Л.Ф. Акустика. М.: Высшая школа, 1978. 448 с.

7. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
8. Муха Ю.П., Суркаев А.Л. Исследование эффекта нелинейности взаимодействующих ударно-акустических волн давления // ПЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 15. С. 43–47.
9. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х т.: Т.2. М.: Мир, 1991. 552 с.
10. Пирунов У.Г. Численные методы. М.: Дрофа, 2004. 224 с.
11. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
12. Смирнов А. П. Применение полунявного численного метода Эйлера-Коши-Абарбанеля и Цваса для решения нестационарных уравнений газовой динамики // Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва. Донецьк: Інститут фізики гірничих процесів НАН України, 2005. С. 121–128.
13. Хвоцан О.В., Курашко Ю.И., Литвинов В.В. К вопросу уменьшения массогабаритных показателей погружных электроразрядных комплексов // Электронная обработка материалов. 2009. № 4. С. 87–92.
14. Сеницын В.В. Пластичные смазки в СССР. Ассортимент: Справочник. М.: Химия, 1979. 272 с.
15. Шамко В.В., Кучеренко В.В. Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда. Препринт № 20, ИИПТ НАН Украины, Николаев, 1991. 52 с.
16. Шамко В.В. Определение макроскопических свойств водонефтяных эмульсий// Материалы III научной школы «Импульсные процессы в механике сплошных сред (6–10 сентября 1999 г.)». Николаев, 1999. С. 97–98.

Поступила 11.01.10

Summary

With use of mathematical modelling research of influence of parametres of the electrodischarge device on behaviour of viscous measure in a punched hole well bottom zone is executed. Recommendations about improvement of an electrodischarge method re-mudding are made.
