

С увеличением значения $K_{i,l}$ возрастает миграция массы вещества к поверхности S , а следовательно, снижается темп затвердевания области $V_{ц.о.}$. Роль этой миграции может быть доведена до минимума при быстром затвердевании изделия, то есть с увеличением скорости продвижения поверхности S .

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов И.А., Акимов А.И., Тюков Н.И. Математическая модель процесса изготовления изделий из композиционных материалов в результате полимеризации // Труды Стерлитамакского филиала Академии наук Республики Башкортостан, 2001, Вып. 2. Уфа: Гилем. С. 6 – 9.

Поступила 15.01.03

Summary

Criteria of similarity have been obtained which describe the polymerization process in multi-layer structures made of composite materials in an electric field. The paper has determined the effect of individual criteria upon the process dynamics.

О.Н. Сизоненко, Г.А. Барбашова, О.В. Хвощан

К ВОПРОСУ О РАСПРОСТРАНЕНИИ ВОЛНЫ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАСТЕ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В СКВАЖИНЕ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Теоретическими и экспериментальными исследованиями, проведенными в различных странах в последние годы, установлено, что наиболее эффективные технологии разработки трудноизвлекаемых запасов нефти основываются на использовании различных физических полей. Накопленный нами опыт использования высоковольтного электрического разряда в скважине для воздействия на продуктивные пласты показывает, что при оптимальном выборе объектов обработки и применяемых технологических приемах можно заметно интенсифицировать фильтрационные процессы в пластах и повысить их нефтеотдачу [1 – 3].

Согласно существующим представлениям о механизме электроразрядного воздействия на пласт, преобладающее действие на изменение фильтрационных характеристик в пористой насыщенной среде нефтяного коллектора оказывают волны сжатия, создающие и развивающие радиальные и цилиндрические трещины [4]. В условиях скважины картина распространения волн сжатия из скважины в пласт усложняется ввиду наличия обсадных труб и цементного кольца между трубой и породой продуктивного коллектора. Поэтому значительный интерес представляет исследование воздействия волн сжатия при высоковольтном электрическом разряде в скважине на призабойную зону скважин, представленное в данной работе.

Для решения поставленной задачи использовались методы физического и математического моделирования. Характеристики электрического разряда получены в камере высокого давления, которая является частью экспериментального стенда для физического моделирования скважинных условий. Схема разрядной камеры электроразрядного устройства (ЭРУ) приведена на рис. 1.

При построении математической модели распространения волн сжатия в скважине приняты следующие допущения: стенки электроразрядного устройства и скважины абсолютно жесткие; канал разряда, образованный в жидкости при ее пробое [5], в начальный момент времени имеет форму прямого кругового цилиндра, высота которого равна длине межэлектродного промежутка, а ось симметрии совпадает с осью симметрии скважины и ЭРУ; стенка канала непроницаема; скважина заполнена идеальной сжимаемой жидкостью, а канал разряда – идеальной плазмой.

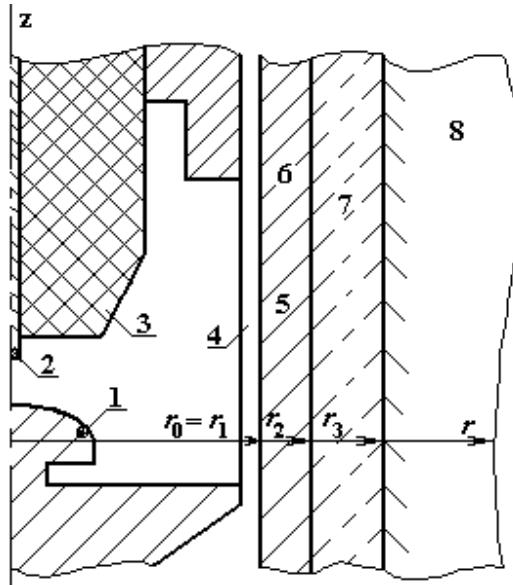


Рис. 1. Схема разрядной камеры электроразрядного устройства:
1, 2 – электроды, 3 – изолятор, 4 – «окно» разрядной камеры, 5 – стенка скважины, 6 – обсадная колонна, 7 – цементное кольцо, 8 – продуктивный пласт

В соответствии с принятыми допущениями математическая постановка задачи состоит в следующем. В области, внутренней границей которой является контактный разрыв плазма – жидкость (стенка канала разряда), а внешней – неподвижная жесткая стенка (поверхности скважины и ЭРУ), необходимо решить систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики, записанных в цилиндрической системе координат и представляющих собой законы сохранения массы, импульса и энергии [6]:

$$\frac{\partial(rF_1)}{\partial t} + \frac{\partial(rF_2)}{\partial z} + \frac{\partial(rF_3)}{\partial r} = F_4, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} F_1 &= [\rho, \rho v_r, \rho v_z, e]^T; \\ F_2 &= [\rho v_z, \rho v_z v_r, \rho v_z^2 + p, (e + p)v_z]^T; \\ F_3 &= [\rho v_r, \rho v_r^2 + p, \rho v_r v_z, (e + p)v_r]^T; \\ F_4 &= [0, p, 0, 0]^T; \end{aligned}$$

t – время; r, z – цилиндрические координаты; v_r, v_z – радиальная и осевая компоненты вектора скорости жидкости; p – давление; ρ – плотность; $e = \left[\varepsilon + (v_r^2 + v_z^2)/2 \right]$; ε – удельная внутренняя энергия [6], определяемая по формуле

$$\varepsilon = \frac{p - c_0^2(\rho - \rho_0)}{\rho(k - 1)} \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность покоящейся жидкости; c_0 – скорость звука в покоящейся жидкости; $k = 7,15$.

На внутренней границе расчетной области задается давление, определяемое при решении уравнения баланса энергии в канале разряда [5]:

$$\frac{d(p_k V_k)}{dt} \frac{1}{\gamma - 1} + p_k \frac{dV_k}{dt} = N(t), \quad (3)$$

где p_k – давление в канале разряда; V_k – объем канала разряда; $\gamma = 1,26$; $N(t)$ – скорость ввода энергии в канал разряда.

На внешней границе расчетной области – неподвижной жесткой стенке – ставится условие непротекания [6]:

$$v_n = 0, \quad (4)$$

v_n – нормальная составляющая вектора скорости жидкости.

Начальные значения гидродинамических характеристик соответствуют невозмущенному состоянию жидкости, в начальный момент времени скорость расширения канала разряда равна нулю, его радиус равен 0,1 мм, а давление в канале разряда превышает давление в окружающей жидкости на 1 МПа.

Система уравнений (1) – (2) решается конечноразностным методом С.К. Годунова [6]. Используется подвижная расчетная сетка, при построении которой учитываются форма внутренней поверхности разрядной камеры и расширение канала разряда. Давление в канале разряда определяется из уравнения (3) двухшаговым методом Эйлера. Объем канала разряда и его производная по времени вычисляются по координатам поверхности канала и скорости его расширения, полученными при решении задачи о распаде произвольного разрыва [6] на контактной границе плазма–жидкость. Алгоритм решения внутренней задачи гидродинамики при электрическом разряде в воде приведен в работе [7].

Функция $N(t)$ в уравнении (3) определяется по формуле

$$N(t) = u(t) \cdot i(t), \quad (5)$$

где $u(t)$ – напряжение в канале разряда; $i(t)$ – ток в канале разряда.

Значения тока и напряжения получены экспериментально в ЭРУ, схема разрядной камеры которого приведена на рис. 1. Начальное напряжение на конденсаторной батарее, имеющей емкость 2,4 мкФ, равно 30 кВ, индуктивность электрической цепи – 3 мкГн, расстояние между электродами – 0,02 м. Исследования проводились при значениях гидростатического давления 0,1; 10; 20; 30; 40 МПа. Рабочей средой в разрядной камере являлась вода и водонефтяная эмульсия (ВНЭ), обводненность которой составляла 30%.

Обводненность O и плотность ρ ВНЭ определялись соответственно методом Дина–Старка и пикнометрическим методом по методике [8].

Ранее [9] скорость звука c_0 в ВНЭ определялась в зависимости от температуры без учета влияния гидростатического давления. В настоящей работе использованы экспериментальные данные работы [10] по зависимости скорости звука в ВНЭ от давления и температуры, поскольку значения плотности ВНЭ ($\rho = 958 \text{ кг/м}^3$ при 20°C), используемой нами и приведенные в этой работе, совпадают. Зависимость скорости звука от гидростатического давления при температуре 20°C (температура среды в условиях эксперимента) для ВНЭ с $\rho = 958 \text{ кг/м}^3$ приведена в табл. 1.

Таблица 1

p_r , МПа	0,1	10	20	30	40
c_0 , м/с	1480	1580	1590	1600	1620

Для расчета продольных компонентов напряжений, возникающих в пласте при гидродинамической нагрузке, которые являются определяющими при создании трещин, использована формула [11]:

$$\sigma_{rr}^3 = \frac{8c_1c_2c_3\rho_1\rho_2\rho_3}{(c_3\rho_3 + c_2\rho_2)(c_1\rho_1 + c_2\rho_2)(c_1\rho_1 + c_0\rho_0)} \sqrt{\frac{r_0}{r}} \times \\ \times f \left[t - \frac{(r-r_3)}{c_3} - \frac{(r_3-r_2)}{c_2} - \frac{(r_2-r_1)}{c_1} + \frac{(r_1-r_0)}{c_0} \right] \times \\ \times H \left[t - \frac{(r-r_3)}{c_3} - \frac{(r_3-r_2)}{c_2} - \frac{(r_2-r_1)}{c_1} + \frac{(r_1-r_0)}{c_0} \right].$$

Здесь c_i – скорости продольных упругих волн; ρ_i – плотности упругих сред; r – радиальная координата; r_1, r_2, r_3 – соответственно внутренний и внешний радиусы обсадной трубы и внешний

радиус цементного кольца; $f(t)$ – давление в жидкости при $r = r_0$; r_0 – координата фиксированной точки в жидкости; $H(x)$ – единичная функция Хевисайда. Индексами 1, 2, 3 обозначены величины, соответствующие стальной трубе, цементному кольцу и породе коллектора.

По этой же формуле определялось напряжение в стальной обсадной трубе и цементном кольце.

Продольные компоненты напряжения устанавливались в плоскости срединного сечения канала разряда по величине давления на стенку скважины, то есть $r_0 = r_1$, а функция $f(t)$ – временная зависимость давления на стенку скважины в этой же плоскости.

Характеристики упругих сред, которые использованы при выполнении расчетов по данным [12], представлены в табл. 2.

Таблица 2

Материал	Скорость звука c_i , м/с	Плотность ρ_i , кг/м ³
Вода	1500	1000
Сталь	5000	7850
Цемент	2900	1800
Песчаник	3500	2500
Карбонат (известняк)	3600	2600

Согласно приведенным на рис. 2 и 3 временным зависимостям гидродинамического давления на стенку скважины в плоскости срединного сечения канала разряда, амплитуда избыточного давления с ростом гидростатического давления уменьшается как в воде (рис.2), так и в ВНЭ (рис.3). Хотя необходимо отметить, что амплитудные значения давления в ВНЭ при p_r свыше 20 МПа существенно (почти в 2 раза) выше, чем в воде, и зависимость амплитуды давления от p_r значительно меньше. Разница между абсолютными значениями давления в воде и в ВНЭ при равных гидростатических давлениях составляет около 10%.

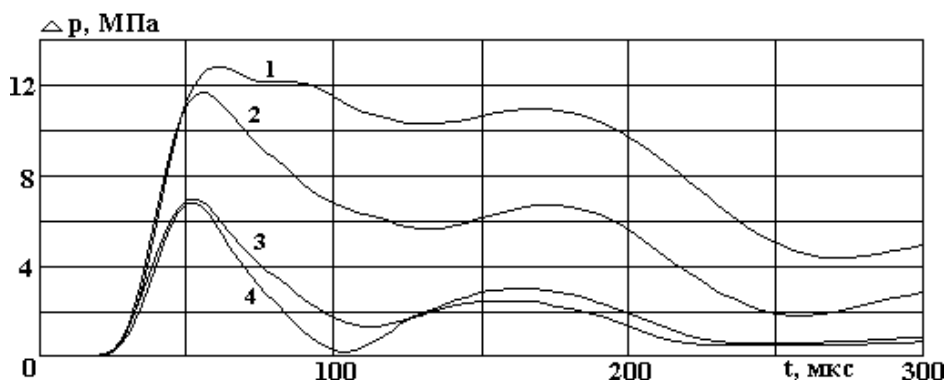


Рис. 2. Давление на стенку скважины в плоскости срединного сечения канала разряда при электрическом разряде в воде. P_r , МПа: 1 – 0,1; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30

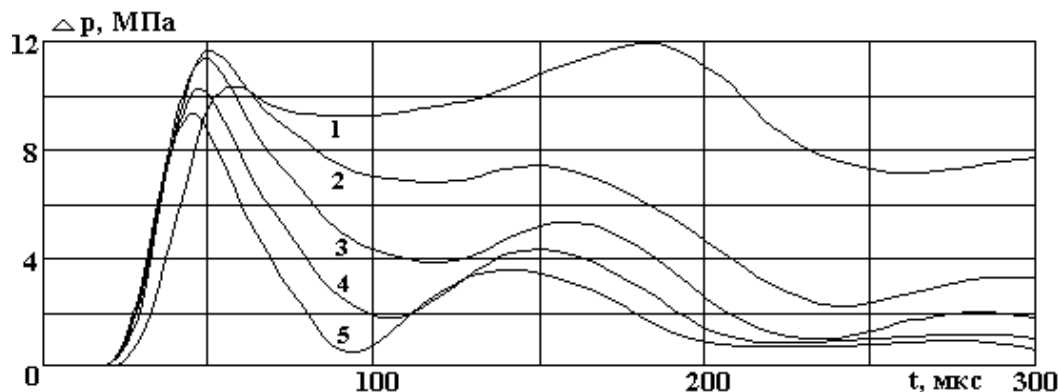


Рис.3 Давление на стенку скважины в плоскости срединного сечения канала разряда при электрическом разряде в ВНЭ. P_r , МПа: 1 – 0,1; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40

Та же тенденция зависимости от среды в скважине сохраняется и в величинах напряжений в упругих средах при прохождении в них упругих волн. Так, величины напряжений в обсадной трубе, цементном кольце и в породе (рис.4) при электроразряде в ВНЭ выше, чем в воде. Наибольшие потери механической энергии (в 2 раза) происходят при прохождении волной сжатия обсадной трубы (см. рис.4). В цементном кольце потери составляют около 15%, далее в породе напряжения экспоненциально затухают, и на расстоянии 0,3 м от стенки скважины разница в значениях амплитуды напряжений (в зависимости от среды в скважине) составляет не более 10% (рис.5).

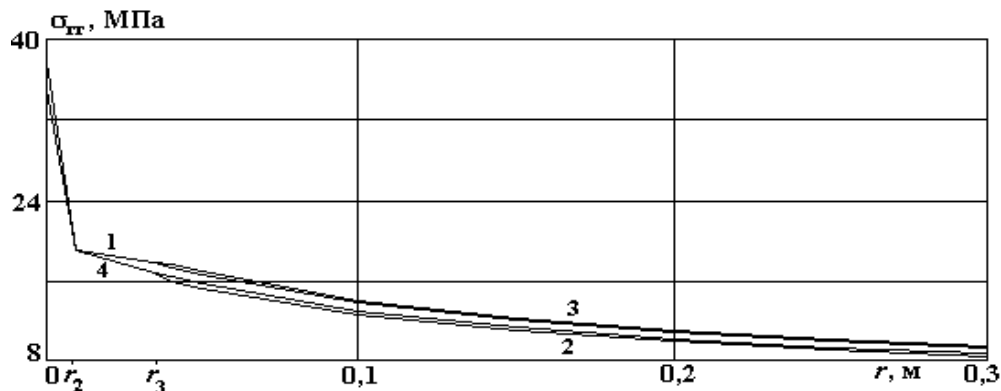


Рис. 4. Максимальные значения напряжений в упругих средах при $p_r = 30$ МПа, 1 – песчаник, разряд в ВНЭ; 2 – песчаник, разряд в воде; 3 – известняк, разряд в ВНЭ; 4 – известняк, разряд в воде

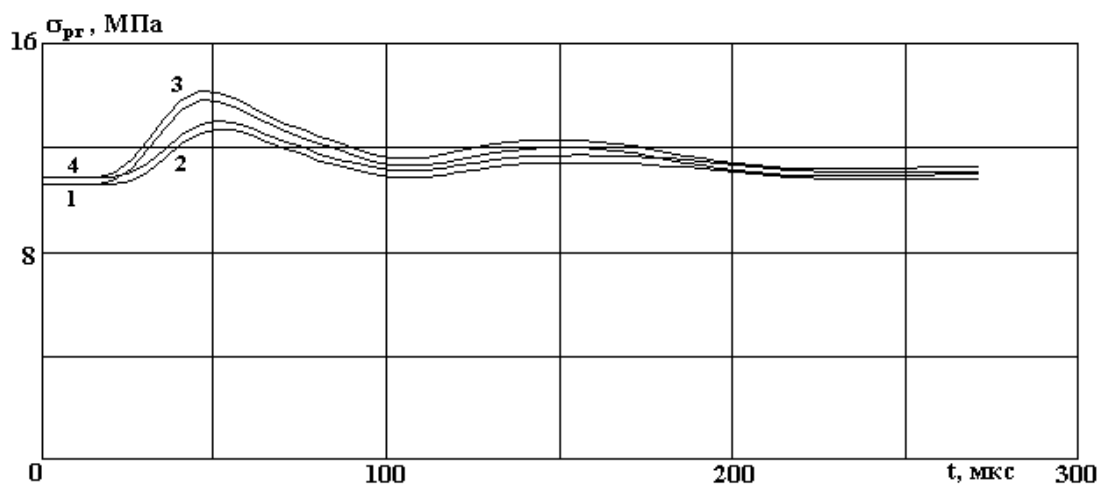


Рис. 5. Продольные напряжения на расстоянии 0,1 м от стенки скважины при $p_r = 30$ МПа. 1 – песчаник, разряд в ВНЭ; 2 – песчаник, разряд в воде; 3 – известняк, разряд в ВНЭ; 4 – известняк, разряд в воде

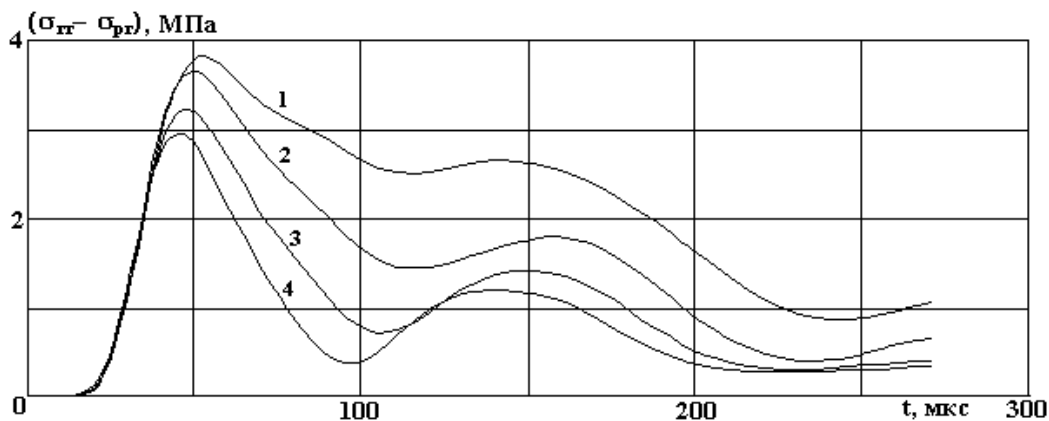


Рис. 6. Разность между напряжениями, вызванными волной сжатия в ВНЭ и внутрискважинным давлением жидкости на расстоянии 0,1 м от стенки скважины. P_r , МПа: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40

Напряжения, возникающие в известняках, несколько выше, чем в песчаниках, что объясняется их акустическими свойствами, однако тенденция затухания для этих пород одинакова как при электроразряде в воде, так и при электроразряде в ВНЭ (см. рис.5).

Влияние гидростатического давления в скважине на изменение напряжений в пласте сказывается более значительно, чем на давление в жидкости, при увеличении гидростатического давления с 10 до 40 МПа максимум гидродинамического давления снижается на ~ 20%, а напряжения (разность между напряжением, вызванной волной сжатия, и напряжением, вызванным в породе внутрискважинным давлением жидкости) – на ~ 30% (рис. 6).

Таким образом, выполненная работа позволяет дать оценку электроразрядного воздействия на призабойную зону скважины в зависимости от породы коллектора, пластового давления и жидкости, заполняющей скважину, и дает возможность управлять процессом воздействия в конкретных геолого-технологических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Максутов Р.А., Сизоненко О.Н., Малюшевский П.П. и др.* Использование электровзрывного воздействия на призабойную зону скважины // Нефтяное хозяйство. 1985. № 1. С. 34 – 35.
2. *Сизоненко О.Н., Швец И.С.* Особенности электроразрядной технологии интенсификации фильтрационных процессов в нефтяных скважинах // Современные проблемы электрофизики и электродинамики жидкостей. Санкт-Петербург, 1998. С. 137 – 139.
3. *Сизоненко О.Н., Швец И.С., Кучернюк А.В.* Применение электроразрядного воздействия для обработки добывающих и нагнетательных скважин // Нефтяное хозяйство. 2000. № 12. С. 133 – 135.
4. *Сизоненко О.Н., Любимов А.Д., Денисюк О.Н.* Исследование влияния профиля волны сжатия электроразряда на изменение пористости и проницаемости осадочных пород // Физика и техника высоких давлений. 1997. № 1. С. 107 – 111.
5. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. М., 1971.
6. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С. К. Годунова. М., 1976.
7. *Барбашова Г.А., Иванов А.В.* Поведение тонкой цилиндрической оболочки под действием импульсной нагрузки // Электрический разряд в конденсированных средах. Киев, 1989. С. 55 – 60.
8. *Боровая М.С.* Лаборант нефтяной и газовой лаборатории. М., 1968.
9. *Сизоненко О.Н., Любимов А.Д., Денисюк О.Н., Хвоцан О.Н., Петухов С.В.* Исследование зависимости фильтрационных характеристик коллекторов от воздействия электрического разряда в водонефтяной эмульсии // Нефтяное хозяйство. 2002. № 1. С. 43 – 45.
10. *Беляков В.Л.* Автоматический контроль параметров нефтяных эмульсий. М., 1992.
11. *Дворкин Я.П., Максутов Р.А., Сизоненко О.Н.* О распространении волны напряжений в пласте при осесимметричном разряде в скважине // Тез. докл. III Всесоюзной научно-технической конференции «Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности». Киев, 1984.
12. Геофизические методы исследования скважин. Справочник геофизика / Под ред. В.М. Запорожца. М., 1983.

Поступила 23.01.03

Summary

The mathematical model of propagation and influence of stress waves on the hole bottom zone of oil wells is created and considered. Theoretical and experimental data about using the water electrolyte and water-oil emulsion as working fluid is used.