

Рис. 3 – Зависимость безразмерного давления внутри канала от безразмерного времени

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иваев В.В., Швед И.С., Иванов А.В. Подводные искровые разряды. – К.: Наукова думка, 1982. – 102 с.
2. Коул Р. Подводные взрывы. – М.: ИЛ, 1950. – 494 с.
3. Наугольных К.А., Рой М.А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 155 с.

УДК 622. 24: 537. 528

В.М. Косенков, Ю.И. Курашко,
И.С. Швед

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИФИЛЬТРОВОЙ ЗОНЫ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

Наведені результати досліджень впливу параметрів хвилі тиску високовольтного розряду на деформаційні процеси в прифільтрової зоні водних свердловин та фільтраційні властивості в поровому середовищі.

INFLUENCE OF PARAMETERS OF ELECTRODIGIT INFLUENCE ON DYNAMIC AND FILTRATIONAL PROCESSES IN FILTER-BED ZONE OF WATER-SUPPLY WELLS

The given results of researches of influence parameters of a wave of pressure of the high-voltage category on deformation processes in filter-bed zone of water boreholes and filtrational properties in the porous environment.

Острая необходимость в обеспечении экологически чистой питьевой водой требует более широкого и рационального использования ее подземных запасов. Однако, как на стадии строительства и освоения скважин на воду, так и в процессе их эксплуатации из-за различного рода осложнений, связанных с

отложениями продуктов физического, физико-химического и биологического колюмата, производительность водозаборных скважин существенно снижается и требует срочных работ по их реанимации.

Арсенал используемых для этого методов весьма разнообразен. По литературным данным, высокая эффективность восстановления дебита скважин достигается при использовании импульсного воздействия, в частности, с применением подводного высоковольтного электрического разряда [1-4]. При электровзрыве в обрабатываемом горизонте генерируются акустические поля, а также мощные гидротоки, которые и приводят к деколюматирующим эффектам [4].

Отсутствие оценки влияния параметров электроразрядного воздействия на динамические и фильтрационные процессы в призабойной зоне водозаборных скважин существенно сказывается на разработке электроразрядных устройств, а, в конечном счете, и на эффективности восстановления производительности скважин, снизивших свой дебит.

В этой связи данная работа преследует своей целью ответить на ряд вопросов, касающихся выбора параметров волны, генерируемой электроразрядным устройством, а именно:

- какова связь между параметрами волны давления и изменением деформационных процессов в призабойной зоне водозаборной скважины;
- в каком диапазоне изменения параметров волны давления наблюдается существенное увеличение проницаемости призабойной зоны скважины.

Для ответа на эти вопросы воспользуемся математической моделью, описывающей процесс упругопластического деформирования и разрушения пористой, насыщенной жидкостью, среды [5,6] под действием гидродинамической волны, образовавшейся в результате электрического разряда.

$$[(1-m)\rho_1]_{,t} + [(1-m)\rho_1 u_i]_{,i} = 0, \quad (1)$$

$$[m\rho_2]_{,t} + [m\rho_2 w_i]_{,i} = 0, \quad (2)$$

$$[(1-m)\rho_1 u_i]_{,t} + [(1-m)\rho_1 u_j u_i]_{,j} = \sigma_{ij,j}^f - (1-m)p_{,i} - R_i, \quad (3)$$

$$[m\rho_1 w_i]_{,t} + [m\rho_1 w_j w_i]_{,j} = -m p_{,i} + R_i, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} [(1-m)\rho_1(\epsilon_1 + u_i u_i / 2)]_{,t} + [(1-m)\rho_1(\epsilon_1 + u_i u_i / 2)u_j]_{,j} = \\ = [\sigma_{ij}^f u_j]_{,j} + \bar{W}_{u,t}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$[m\rho_2(\varepsilon_2 + w_i w_i / 2)]_t + [m\rho_2(\varepsilon_2 + w_i w_i / 2)w_j]_{,j} =$$

$$= [mpw_i]_{,i} + \bar{W}_{w,t} , \quad (6)$$

$$\bar{W}_{u,t} = -pm_{,t} - R_i u_i , \quad (7)$$

$$\bar{W}_{w,t} = -pm_{,t} - R_i w_i , \quad (8)$$

$$R_i = \mu_2 \frac{m^2}{k} f(\text{Re})(u_i - w_i) , \quad (9)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_2}{\mu_2} \sqrt{\frac{k}{m}} |u - w| , \quad (10)$$

$$\sigma_{ij}^f = (1 - m) [S_{ij} - (\sigma - \varepsilon^* p) \delta_{ij} + \rho_{ij}] , \quad (11)$$

$$\dot{S}_{ij} = 2G \left(\dot{e}_{ij} + \frac{\dot{\rho}_1}{3\rho_1} \delta_{ij} \right) , \quad (12)$$

$$\dot{\rho}_{ij} = 2g \dot{e}'_{ij} , \quad (13)$$

$$\varepsilon^* = \frac{K_u}{K} , \quad (14)$$

$$\dot{\sigma} = -K_u \dot{e} , \quad (15)$$

$$\sigma \geq -\frac{1}{3} \sigma_r , \quad (16)$$

$$\dot{e} = \dot{e}_{11} + \dot{e}_{22} + \dot{e}_{33} , \quad (17)$$

$$\dot{e}_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) , \quad (18)$$

$$S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{33}^2 + 2(S_{12}^2 + S_{23}^2 + S_{31}^2) \leq \frac{2}{3}(\sigma_T + \alpha\sigma)^2, \quad (19)$$

$$\sigma_T = \begin{cases} \sigma_r, & \text{при } \sigma < 0 \\ \sigma_{sg}, & \text{при } \sigma \geq 0, \end{cases} \quad (20)$$

$$p = c_0^2(\rho_2 - \rho_{20}) + (\kappa - 1)\rho_2 \varepsilon_2, \quad (21)$$

$$p \geq p_s, \quad (22)$$

где $\rho_1, \rho_2, \rho_{10}, \rho_{20}$ - плотность материала твердой и жидкой фаз, соответственно в возмущенном и невозмущенном состояниях, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; m - пористость матрицы; u_i, w_i - компоненты вектора скорости твердой и жидкой фаз ($i = 1, 2, 3$), $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; p - давление жидкости, Па; σ'_{ij}, S_{ij} - тензор и девиатор тензора эффективных напряжений, Па; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - внутренняя энергия твердой и жидкой фаз, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$; $f(Re)$ - функция влияния режима течения на межфазовое взаимодействие [5]; Re - число Рейнольдса для пористой среды; μ - коэффициент динамической вязкости жидкости, $\text{кг}\cdot(\text{м}\cdot\text{с})^{-1}$; k - коэффициент проницаемости пористой среды, м^2 ; e_{ij}, e'_{ij} - полная и пластическая компоненты тензора деформаций; G - модуль сдвига матрицы, Па; K_u, K - модуль объемного сжатия матрицы и модуль объемного сжатия материала матрицы, Па; σ - среднее напряжение в матрице, Па; σ_n, σ_{sg} - предел текучести матрицы на сжатие и растяжение, соответственно, Па; p_s - давление насыщенных паров жидкости, Па; δ_{ij} - символ Кронекера; ρ_{ij} - тензор микронапряжений; g - модуль упрочнения матрицы, Па; κ - эмпирический коэффициент жидкости; c_0 - скорость звука в невозмущенной жидкости, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; α - коэффициент внутреннего трения материала матрицы; (запятые в индексах означают ковариантное дифференцирование).

Уравнения (1) - (6) описывают законы сохранения массы, импульса и энергии в твердой матрице и насыщающей ее жидкости [5]. Межфазовое взаимодействие сред учитывается соотношениями (7) - (10) в соответствии с гипотезой Н. Е. Жуковского. Связь между деформациями и напряжениями устанавливается на основе обобщенного закона Гука (11) с использованием теории пластического течения (12). Поверхность пластического течения, с учетом упрочнения по закону Кулона, описывается модифицированным условием Губера-Мизеса (19) [7]. Скорости деформаций и перемещений связаны геометрическими соотношениями (18). Соотношения (15) и (21) являются уравнениями состояния твердой и жидкой фаз.

Процесс разрушения от сжатия матрицы пористой среды происходит при выполнении условия

$$S_{11}^2 + S_{22}^2 + S_{33}^2 + 2(S_{12}^2 + S_{23}^2 + S_{31}^2) = \frac{2}{3}([\sigma]_{sg} + \alpha\sigma)^2, \quad (23)$$

где $[\sigma]_{\text{сж}}$ - предел прочности матрицы на сжатие, Па.

Образование трещин отрыва, с приемлемой для практики точностью расчетов разрушения хрупких сред, происходит при выполнении условия первой теории прочности

$$\sigma_{ii} \geq [\sigma]_{\Gamma}, \quad (24)$$

где $[\sigma]_{\Gamma}$ - предел прочности матрицы на растяжение, Па.

Образующаяся при этом трещина перпендикулярна направлению наибольшего напряжения. Учитывая осевую симметрию задачи, можно утверждать о совпадении направлений наибольших и наименьших нормальных напряжений с координатными осями, вследствие чего образующиеся трещины также будут направлены параллельно координатным осям.

В области разрушения матрицы от сжатия, пределы прочности и текучести материала на растяжение полагаются равными нулю

$$[\sigma]_r = 0; \sigma_r = 0. \quad (25)$$

В направлении, перпендикулярном трещине отрыва, предел прочности на растяжение равен нулю. Если берега трещины не контактируют между собой (ширина трещины $h_n > 0$), тогда перпендикулярные к ним нормальные компоненты напряжений (σ_n) полагаются равными нулю. При этом компоненты сдвиговых напряжений (σ_{τ}), направленные вдоль трещин, тоже равны нулю

$$\sigma_n = 0; \sigma_{\tau} = 0. \quad (26)$$

Система уравнений (1) - (26) должна быть дополнена соответствующими начальными и граничными условиями. На непроницаемых поверхностях задаются условия не протекания

$$u_n = w_n, \quad (27)$$

где u_n, w_n - компоненты скоростей твердого тела и жидкости, нормальные к поверхности границы. На проницаемых поверхностях задаются условия типа "жидкий" поршень [5]

$$\sigma_{mn}^f = 0; p_f = p_p, \quad (28)$$

где σ_{mn}^f - компонента тензора эффективных напряжений, нормальная к поверхности границы; p_f, p_p - давление жидкости в однофазной и пористой средах соответственно, Па.

В качестве базовых параметров призабойной зоны водозаборной скважины можно выбрать значения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 - Базовые параметры трехслойной среды призабойной зоны
водозаборной скважины

Обозначение параметров	Размерность	Параметры слоя		
		Фильтр	Гравийно-песчаная обсыпка	Водоносный слой
r_v – радиус внутренней границы слоя	м	0,140	0,143	0,173
r_n – радиус внешней границы слоя	м	0,143	0,173	∞
m	-	0,3	0,25	0,15
k	m^2	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}
K_n	10^{10} Па	2	0,05	1
G	10^{10} Па	1,2	0,055	0,75
ε^*	-	0,5	0,05	0,1
ρ_{10}	кг/м ³	7850	2300	2600
ρ_{20}	кг/м ³	1000	1000	1000
μ	кг/(м с)	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
α	рад	0,17	0,6	0,52
C_0	м/с	1470	1470	1470
κ	-	7,15	7,15	7,15
σ_{sp}	10^5 Па	6500	0,1	250
σ_r	10^5 Па	6500	0,01	25
$[\sigma]_{sp}$	10^5 Па	7600	10	400
$[\sigma]_r$	10^5 Па	7600	1	40
p_s	10^5 Па	0	0	0
Глубина скважины	м	200	200	200

Решение [8] системы уравнений (1) – (28) позволяет изучить особенности процессов деформирования и фильтрации призабойной зоны при воздействии на нее волны давления высоковольтного разряда в воде, параметрами которой являются: максимальное давление на стенку скважины P_m , время нарастания давления на переднем фронте волны τ_0 и время релаксации волны давления τ .

Как показывают результаты расчетов, изменение деформационных процессов (образование радиальных трещин) и фильтрации (коэффициента проницаемости) призабойной зоны имеют три специфических участка (рис. 1, рис. 2).

Отсутствие изменения проницаемости на первом участке связано с чисто упругим режимом деформирования призабойной зоны скважины при малой амплитуде волны давления. В этих условиях волна давления вызывает только нестационарную фильтрацию жидкости в пористой среде. Увеличение амплитуды волны давления интенсифицирует не только фильтрационные процессы, но и деформации матрицы пористой среды, вызывая появление в ней необратимых изменений (остаточных деформаций). Появление остаточных деформаций и трещин вызывает изменение проницаемости матрицы и определяет

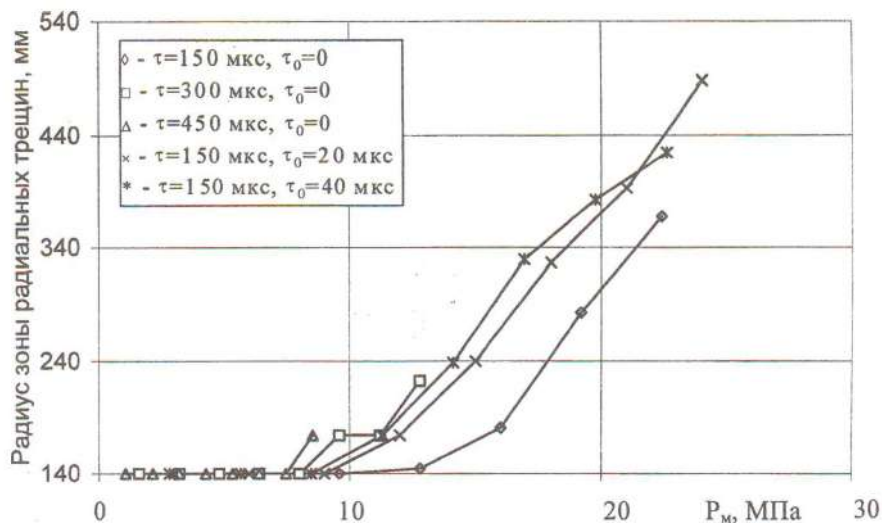


Рис. 1 – Влияние параметров волны давления на радиус зоны радиальных трещин

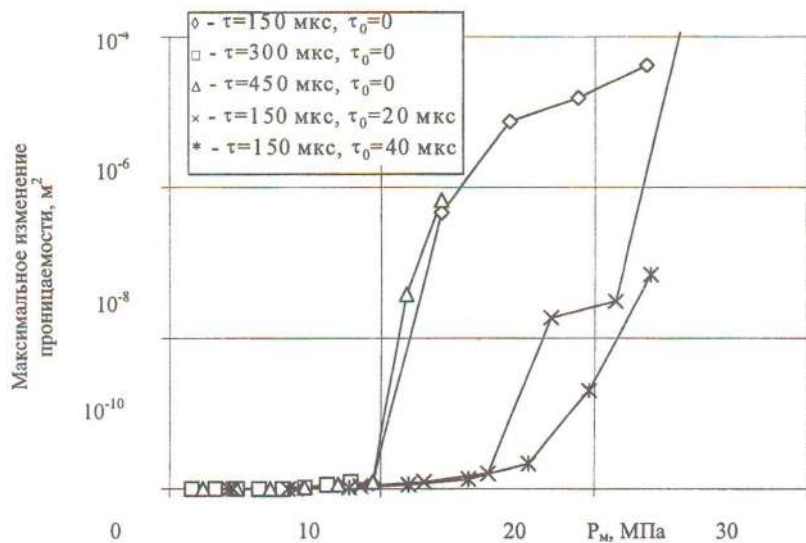


Рис. 2 – Влияние параметров волны давления на максимальное изменение проницаемости

начало второго участка изменения проницаемости пористой среды призабойной зоны. Первые остаточные изменения в виде трещин сдвига появляются в гравийно-песчаной обсыпке (рис. 3), прорастая по всей толщине слоя при относительно малом изменении амплитуды волны давления. Достигнув более прочной породы водоносного слоя, развитие трещин останавливается.

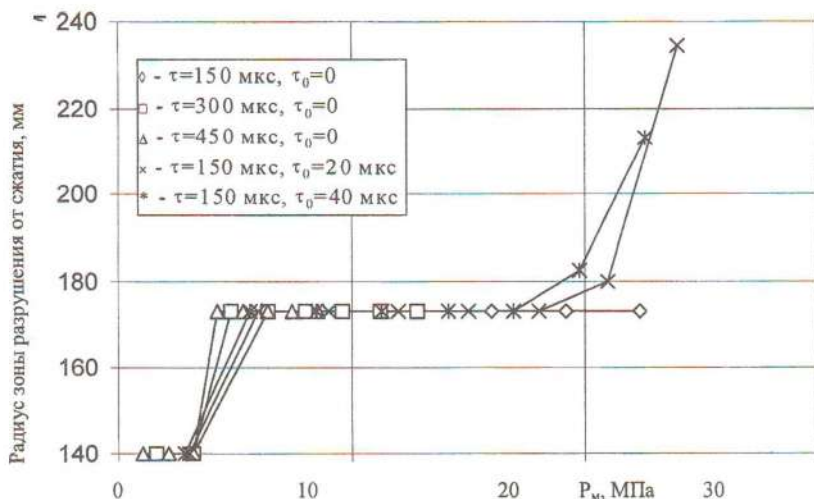


Рис. 3 – Влияние параметров волны давления на радиус зоны разрушения

Положение коренным образом меняется, если амплитуда волны давления достаточна, чтобы вызвать в матрице пористой среды рост радиальных (рис. 1) и окружных (рис. 4) трещин отрыва. Появление трещин отрыва переводит материал матрицы пористой среды из объемного напряженного состояния в состояние, близкое к плоскому или одноосному. При этом деформации материала существенно возрастают, вызывая быстрый рост проницаемости.

Таким образом, при выборе параметров импульсного воздействия на призабойную зону водозаборных скважин с целью их реанимации необходимо обеспечить, как минимум, режим дробления слоя гравийно-песчаной обсыпки ($P_m > 5$ МПа).

Наибольшее же увеличение проницаемости призабойной зоны скважины достигается при амплитудных значениях волны давления $P_m > 12$ МПа, обеспечивающих рост радиальных трещин в пористой среде.

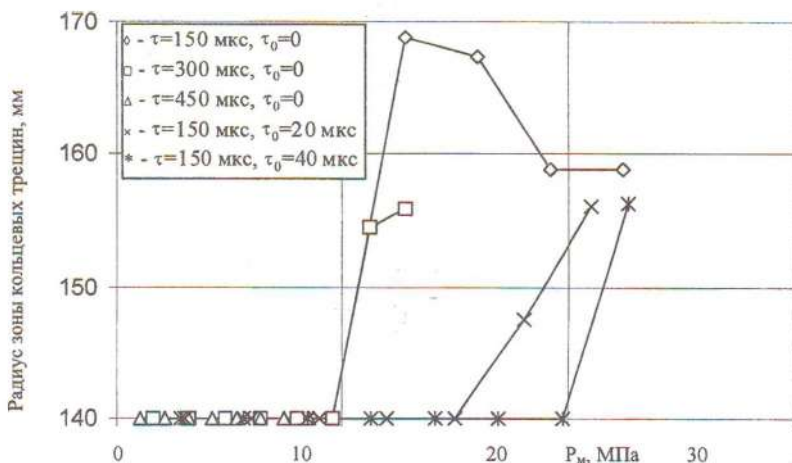


Рис. 4- Влияние параметров волны давления на радиус зоны окружающих трещин

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романенко В.А., Вольницкая Э.М. Восстановление производительности водозаборных скважин. - Л.: Недра, 1986. - 112 с.
2. Малишевский В.Т., Тарабара В.П., Цуркин В.Н., Швец И.С. Регенерация скважин на воду погружным электровзрывным устройством // Водоснабжение и санитарная техника. - 1990. - №12. - С. 13.
3. Дубовенко К.В., Курашко Ю.И., Швец И.С., Онищенко Л.И. Разрядно-импульсное оборудование для увеличения дебита нефтяных и водозаборных скважин // Вестник национального технического университета «ХПИ». — 2002. — №7. — С. 92 – 102.
4. Сизоненко О.Н., Швец И.С., Кучернюк А.В. Применение электроразрядного воздействия для обработки добывающих скважин // Нефтяное хозяйство. — №12. — С.133 – 135.
5. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. - М.: Недра, 1984. - 232 с.
6. Косенков В.М. Математическая модель динамики пористых насыщенных жидкостью упруго-пластических сред при электрическом взрыве в воде // Проблемы прочности. - 1997. - №1. - С. 87-96.
7. Механический эффект взрыва в грунтах. / Под ред. И. А. Лучко. — К.: Наукова думка, 1989. — 232 с.
8. Майнчен Дж., Сак С. Метод расчета «Тензор» // Вычислительные методы в гидродинамике. — М.: Мир, 1967. — С. 185-211.

УДК 662.831.322.1

К.К. Софийский, А.В. Чернай,
Б.В. Бокий, Д.П. Силин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НАПРЯЖЕННЫЕ ГАЗОНАСЫЩЕННЫЕ СРЕДЫ

Робота присвячена розробці математичної моделі розрахунку процесу гідродинамічного впливу на напружені газонасичені середовища, що базується на кількісних методах вирішення задач фільтрації.

THE MATHEMATICAL MODEL OF HYDRODYNAMICAL INFLUENCE ON INTENSE GAS-SATURATED ENVIRONMENTS

The work is devoted to development of mathematical model of account of process of hydrodynamical influence on the sated gas intense environments, which is based on numerical methods of the decision of tasks of a filtration.

Гидродинамическое воздействие на напряженные газонасыщенные среды является одним из наиболее перспективных способов предотвращения