

УДК 537.528

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

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ,
ГЕНЕРИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ В ЖИДКОСТИ**

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

**МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ХВИЛІ ТИСКУ, ЯКА
ГЕНЕРУЄТЬСЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ РОЗРЯДОМ У РІДИНІ**

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

**METHODS FOR DETERMINING PARAMETERS OF WAVE PRESSURE
GENERATED BY ELECTRICAL DISCHARGE IN THE FLUID**

Аннотация. В работе выполнен обзор расчетных методик, которые позволяют определить параметры волны давления при электрическом разряде в воде на некотором расстоянии от канала разряда. Отмечено разнообразие используемых в научной литературе подходов: математическое моделирование, эмпирические и полуэмпирические расчетные модели и выражения. При начальных условиях, которые соответствуют параметрам электроразрядного способа интенсификации добычи нефти, выполнено сравнение амплитудного значения волны давления, рассчитанного при помощи выбранных расчетных методик, с экспериментальными данными. Отмечено, что при индуктивности разрядного контура 4 мкГн наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. При малой индуктивности разрядного контура (0,9 мкГн) отмечается несовпадение расчетных результатов, полученных с помощью некоторых методик, от данных физического эксперимента.

Ключевые слова: электрический разряд в жидкости, волна давления, амплитуда волны давления.

Введение. В настоящее время электроразрядные технологии, базирующиеся на высоковольтном электрическом разряде в конденсированных средах, получили достаточно широкое применение в различных отраслях промышленности: металлургии (очистка литья, обработка расплавов), машиностроении и химической промышленности, строительстве, топливно-энергетическом комплексе, нефтедобывающей и ряде других [1].

Электроразрядные технологии характеризуются комплексным воздействием различных факторов на объект обработки, но во многих из них основным действующим фактором является волна давления (импульс давления), которая возникает и распространяется в жидкости при осуществлении в ней электрического разряда [2-4]. Поэтому, для того, чтобы повысить эффективность технологии, провести ее усовершенствование, необходимо детальное изучение параметров и характеристик генерируемой электрическим разрядом волны давления, рассмотреть ее распространение в жидкости. Исследование распространения волны давления в жидкости при электрическом разряде возможно с помо-

щью методов физического и математического моделирования. При выборе метода исследования необходимо учитывать требуемое время на получение результата, необходимую точность, возможные материальные затраты. Так все математические методы позволяют получить результат быстрее, с меньшими материальными и временными затратами, но, к сожалению, наличие допущений и предположений снижает их точность и соответствие реальным условиям.

Существует несколько подходов математического моделирования, которые позволяют рассчитать поля давления в жидкости при электрическом разряде в воде, каждый из них характеризуется своей точностью, и временными затратами. При этом особый интерес представляет сравнение результатов, полученных с помощью различных расчетных методов.

В большинстве случаев необходимость расчета параметров волны давления в жидкости при электрическом разряде носит прикладной характер. Поэтому данная работа выполнена с привязкой к реально существующей электроразрядной технологии - электроразрядному способу интенсификации добычи нефти [5-7].

Учитывая все вышесказанное целью данной работы является обзор и сравнение различных способов определения параметров волны давления, генерированной электрическим разрядом в жидкости, применительно к электроразрядному способу интенсификации добычи нефти.

Волна давления при электрическом разряде в воде. Электрический разряд в жидкости инициируется пробоем межэлектродного промежутка под действием электрического напряжения, возникающего на электродах при подключении к ним заряженного конденсатора, в результате чего образуется плазменный канал разряда. После этого разрядный ток, достигающий десятков килоампер, разогревает плазму на начальной стадии разряда до температуры порядка 10^4 К. Разогрев плазмы вызывает повышение давления в канале разряда. Под действием повышенного давления канал расширяется. Давление в канале разряда может достигать величин порядка 10^8 Па. Давление в канале в процессе разряда проходит через максимум: на начальной стадии разряда давление в канале возрастает, несмотря на увеличение его объема, и спадает лишь к концу разряда. Расширение канала происходит и после окончания выделения энергии. Первоначально это происходит под действием внутреннего давления, превышающее внешнее гидростатическое давление, а затем уже благодаря инерции потока жидкости. На послеразрядной стадии происходит превращение канала в пузырь. Время жизни парогазового пузыря (ПГП) в открытом объеме жидкости при нормальном давлении достигает нескольких миллисекунд и сопровождается несколькими последовательными затухающими пульсациями. Расширение канала на стадии разряда и последующие пульсации пузыря сопровождаются излучением волн сжатия и разрежения. Волны сжатия излучаются на стадии разряда и при последующем схлопывании пузыря, когда высокое давление в канале, а затем в сжатом пузыре, вызывает уплотнение прилегающих слоев жидкости. Волны сжатия чередуются с относительно длинными волнами разрежения, которые излучаются на стадиях, когда давление в пузыре ниже гидро-

статического [8].

На рис. 1 представлено схематическое изображения волны давления (P) по временной (t) и пространственной (r) координате, генерируемой электрическим разрядом в жидкости [2].

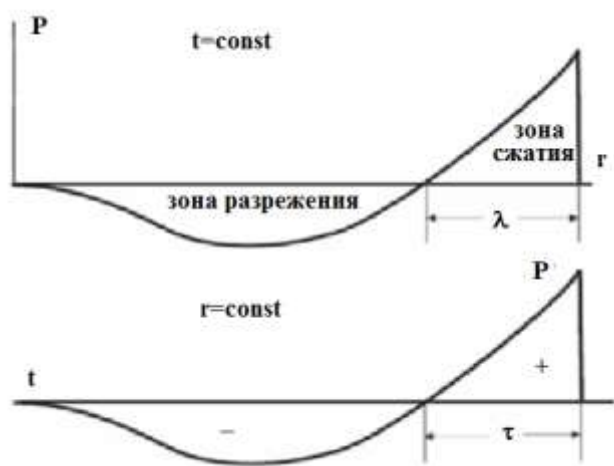


Рисунок 1 – Схематическое изображение волны давления при электрическом разряде в жидкости [2]

Передняя граница волны давления называется фронтом волны давления, пространственную протяженность волны сжатия принято называть длиной волны (на рис.1 - λ). Она меньше протяженности зоны разрежения. Время действия положительного избыточного давления в данной точке пространства (τ) называют периодом волны. По мере удаления от источника инициирования фронт ударной волны уменьшается, а ее длина увеличивается. Известно, что энергия положительной фазы волны давления, вызванная подводным искровым разрядом, является

мерой ее полезной работы [8]. Энергия, выделяющаяся в канале разряда, расходуется в основном на работу, совершаемую каналом при расширении (на это расходуется примерно половина всей энергии).

Работа, совершаемая каналом, подразделяется на энергию волны сжатия, излучаемую на стадии разряда, и на энергию пульсации газового пузыря. Энергия пульсаций постепенно расходуется на излучение волн сжатия и разрежения, а также на другие потери.

Методы расчета полей давления в жидкости при подводном электрическом разряде. В литературе для расчета параметров волны давления при электрическом разряде в воде используется несколько подходов.

В основе первого подхода лежит численное решение системы дифференциальных уравнений. Примером может служить работа [9]. В ней процессы в разрядном контуре и канале разряда описываются согласно [4]: уравнения баланса напряжений в разрядном контуре (1); уравнения баланса энергии (2); уравнения гидродинамики, определяющей связь давления в канале разряда с кинематическими характеристиками его контактной границы (3); уравнения (4), которое определяет связь между сопротивлением канала разряда и удельной электропроводностью плазмы. Для описания распространения волны давления в жидкости используется одномерное волновое уравнение (5) [10].

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

где $I = dq_3 / dt$.

$$\frac{d(p_{\kappa} S_{\kappa})}{dt} \frac{1}{\gamma - 1} + p_{\kappa} \frac{dS_{\kappa}}{dt} = I^2 R_{\kappa} \frac{1}{l}, \quad (2)$$

$$p_{\kappa} = \frac{\rho_0}{2\pi} \frac{d^2 S_{\kappa}}{dt^2} \ln \left(\frac{\pi^{0.5} l}{S_{\kappa}^{0.5}} \right) - \frac{\rho_0}{8\pi S_{\kappa}} \left(\frac{dS_{\kappa}}{dt} \right)^2, \quad (3)$$

$$R_{\kappa} = \frac{Al}{p_{\kappa} S_{\kappa}} \left(\frac{dS_{\kappa}}{dt} \right)^{-1}. \quad (4)$$

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

В соотношениях (1) - (5): I - ток разряда, А; L - индуктивность электрической цепи, Гн; C - емкость конденсаторной батареи, Ф; U_0 - напряжение к началу канальной стадии, В; R_{κ} - сопротивление канала разряда, Ом; $R_{\kappa n}$ - сопротивление шин разрядного контура, Ом; q_z - электрический заряд, Кл; l - расстояние между электродами, м; p_{κ} - давление в канале разряда, Па; S_{κ} - площадь поперечного сечения канала разряда, м²; γ - эффективный показатель адиабаты плазмы канала ($\gamma=1,26$); ρ_0 - плотность покоящейся жидкости, кг/м³; A - искровая постоянная (для случая самопробоя $A=10^5$ В²с/м²), В²·с·м⁻²; t - время, с; φ - потенциал скоростей движения жидкости, м²/с; r_d - пространственная координата, м; c_e - скорость звука в скважинной жидкости, м/с.

Для определения профиля волны может быть также использован полуэмпирический метод расчета гидродинамических параметров волн давления [12], который позволяет определить амплитуду волны давления в жидкости при электрическом разряде (в экваториальной плоскости канала разряда) при нормальном гидростатическом давлении (0,1 МПа). Авторы разделяют три зоны распространения волны давления:

- $a(\tau_N) \leq r \leq 2,5l$ - распространяется цилиндрическая волна давления;
- $2,5l \leq r \leq 5,5l$ - зона перехода цилиндрической волны давления в сферическую;
- $5,5l \leq r \leq 200l$ - зона распространения сферической волны давления.

системой выражений (6):

$$P_{\max} = P_M \cdot b_1(\eta) \cdot \begin{cases} \bar{r}^{-0.5} & \text{при } a(\tau_N) \leq r \leq 2,5l \\ 1,3 \cdot \bar{r}^{-0.5} (1 - 0,1 \cdot r/l) & \text{при } 2,5l \leq r \leq 5,5l, \\ 1,7 \cdot \Pi_l \cdot \bar{r}^{-1,1} & \text{при } 5,5l \leq r \leq 200l \end{cases} \quad (6)$$

где $b_1(\eta) = \eta^{0,3} \left(\frac{0,37 + 0,6 \cdot \eta^2}{1 + \eta^3} \right)^{0,5\alpha} \cdot b_0(\eta)$; $\bar{r} = r/a_M$; $\Pi_l = (l/a_M)^{0,6}$;

$$a_M = \left(\frac{U_0^2 \cdot C^2 \cdot L}{\rho_0 l} \right)^{1/4}; \quad \alpha = 0,73 + 1,22 \cdot \eta^{3/2} \cdot \exp(-1,47 \cdot \eta^3);$$

$$b_0(\eta) = \frac{\gamma - 1}{2\alpha\gamma} \cdot \frac{\eta^{0,3} \cdot (1 - 0,85 \cdot \eta) \cdot (1 + \eta^3)^{2\alpha}}{0,37 + 0,6 \cdot \eta^2} ; \quad P_M = \left(\frac{\rho_0 \cdot U_0^2}{Ll} \right)^{0,5};$$

$$\eta = \begin{cases} (\pi^2 \Pi_K)^{1/3} & \text{для КР} \\ 1,2(1 + 0,3Lg\Pi_K) & \text{для ДР} \end{cases} \quad (\text{КР} - \text{короткий разряд, ДР} - \text{длинный разряд});$$

$$\Pi_K = \frac{Al^2}{U_0^2 \pi \sqrt{LC}}; \quad r - \text{расстояние от оси разряда до точки определения максимального значения давления, м; } l - \text{расстояние между электродами, м; } a(\tau_N) - \text{радиус канала разряда в момент достижения мощности максимума.}$$

Короткий и длинный разряд различаются по величине характерного времени выделения энергии (τ_* , с): для КР – $\tau_* \leq$ от 30 до 40 мкс; для ДР – $\tau_* > 40$ мкс; $\tau_* = \pi \sqrt{LC}$;

Эта полуэмпирическая модель позволяет оценочно определить временной профиль воны давления

$$p \approx P_{\max} \cdot 10^{-t/\tau_{0,1}}, \quad (7)$$

где $\tau_{0,1}$ – время десятикратного спада давления, с; $\tau_{0,1} = 0,74\tau_1 \cdot r^{-0,25}$;

$$\tau_1 = \begin{cases} \tau_* \cdot (1 + \eta^3) & \text{для КР} \\ \tau_* \cdot (1 + \eta^4 / 2) & \text{для ДР} \end{cases}.$$

Представленная в работе [12] методика позволяет, как уже говорилось выше, определить амплитуду волны давления в экваториальной плоскости. В случае необходимости определения давления в точке, удаленной от экваториальной плоскости, можно воспользоваться выражением (8)

$$P_{\max}(\varphi) \approx P_{\max}(0) \left(\frac{3,2}{\pi} |\varphi| \left(\frac{|\varphi|}{\pi - 1} \right) + 1 \right), \quad (8)$$

где φ - угол отклонения от экваториальной плоскости разряда, рад; $P_{\max}(0)$ - амплитуда волны давления в экваториальной плоскости к каналу разряда.

Помимо вышеприведенных подходов, существует еще ряд зависимостей, которые позволяют определить амплитуду волны давления, генерируемой электрическим разрядом в жидкости.

Так в работе [8] приведены зависимости для давления в волне сжатия. При этом рассматриваются разные модели разряда:

- для сферической модели разряда, который характеризуется условием, что длина разрядного промежутка (l , м) мала по сравнению с характерным радиусом канала (R_0 , м), а тот в свою очередь мал по сравнению с длиной волны (λ ,

м), т.е. выполняется условие – $l \ll R_0 \ll \lambda$ (в процессе разряда форма канала близка к сферической) амплитуда волны давления по порядку величин определяется формулой

$$P_{\max} \approx 10^{-3} \frac{1}{r} \left(\frac{CU^6}{L^2} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (9)$$

где (соблюдая авторские обозначения и систему измерений) P_{\max} – давление в жидкости на некотором расстоянии от источника, атм; C – емкость конденсаторной батареи, ф; U – пробивное напряжение, В; L – индуктивность разрядной цепи, Гн; r – расстояние от оси разряда до точки определения давления, см;

- если выполняется условие $R_0 \ll l \ll \lambda$ (канал имеет вытянутую форму, для описания используется модель короткого цилиндра), то амплитуда волны давления в плоскости, перпендикулярной к оси канала разряда и проходящей через его середину, определяется выражением (10). В выражении (10) l – длина разрядного промежутка, в авторской редакции измеряется в см. Остальные величины и их единицы измерения идентичны как в выражении 9). Надо отметить, что при электроразрядном способе декольматации реализуется именно эта модель цилиндра;

$$P_{\max} \approx 10^{-4} \frac{U}{r} \sqrt{\frac{l}{L}}; \quad (10)$$

- при условии $R_0 \ll \lambda \ll l$ может быть рассмотрена модель длинного цилиндра. В этом случае амплитуда волны давления в экваториальной плоскости, можно определить по формуле

$$P_{\max} = \frac{\rho_0 R_0^2 l}{2\tau_*^2 r}. \quad (11)$$

Еще один подход описан в работах [11, 13]. В них представлены эмпирические зависимости для определения амплитуды волны давления на различных расстояниях от источника возмущения (электрического разряда в жидкости), которые также разбиты на три диапазона по расстоянию от источника разряда

$$P_{\max} = \frac{b_1(\Pi_k) \rho_0^{3/8} U_0^{5/4} C^{1/4}}{\sqrt{r} L^{3/8} l^{5/8}}, \quad \text{при } r \leq 2,5l \quad (12)$$

$$P_{\max} = \frac{1,33b_1(\Pi_k)(1 - 0,1r/l) \rho_0^{3/8} U_0^{5/4} C^{1/4}}{\sqrt{r} L^{3/8} l^{5/8}}, \quad \text{при } 2,5l < r \leq 5,5l \quad (13)$$

$$P_{\max} = \frac{1,33b_1(\Pi_{\kappa})\rho_0^{3/8}U_0^{5/4}C^{1/4}}{r^{1,1}L^{3/8}}, \text{ при } 5,5l < r \leq 200l \quad (14)$$

где безразмерная функция $b_1 \Pi_{\kappa} = 0,37\Pi_{\kappa}^{1/3}e^{-12\Pi_{\kappa}}$, а в случае колебательных разрядов $\eta \leq 0,75$; $\Pi_{\kappa} \leq 0,04$ – $b_1 \Pi_{\kappa} = 0,37\Pi_{\kappa}^{1/3}(1 - 12\Pi_{\kappa}) \approx \Pi_{\kappa}^{1/4}$

В дальнейшем представленная в работе [11] теория получила свое развитие в работе [12], которая была описана выше.

Существует ряд экспериментально полученных зависимостей, которые позволяют определить амплитуду волны давления [2, 14, 15].

Например, в работе [14] представлено эмпирическое выражение, которое позволяет определить давление в Бар

$$P_{\max} = k_1 E_b^{\alpha_1}, \quad (15)$$

где $E_b = 0,5(CU_b)^2$ – энергия, выделившаяся в канале разряда, кДж; U_b – напряжение пробоя, В; k_1, α_1 – параметры зависящие от длины межэлектродного промежутка и расстояния от датчика давления до канала разряда.

Исследователями в своей работе [15] использовано выражение, которое одновременно учитывает влияние гидростатического давления

$$P_{\max} = k_2 d^{\beta_2} E_b^{\alpha_2}, \quad (16)$$

где k_2 – коэффициент, зависящий от гидростатического давления; α_2, β_2 – коэффициенты передачи волны давления, с учетом влияния гидростатического давления; d – расстояние от канала разряда до датчика давления.

Однако, как для выражения (15), так и для выражения (16) необходимо экспериментальное определение коэффициентов, входящих в вышеприведенные зависимости, так как приведенные в работах [14-15] коэффициенты имеют строгую привязку к условиям проведения эксперимента в данных работах.

Сравнение различных способов определения амплитуды волны давления. Выполненный обзор научной литературы показал разнообразие применяемых подходов для определения параметров волны давления при электрическом разряде в жидкости. В результате анализа было принято решение, что для выполнения дальнейших исследований волны давления при электрическом разряде в воде будут использованы:

- система дифференциальных уравнений (1-5);
- полуэмпирическая методика расчета (6);
- зависимости (9-10).

В качестве параметра волны давления, по которому выполнялось сравнение различных расчетных методик, была выбрана ее амплитуда, как величина определяющая эффективность механического действия волны давления при электрическом разряде в жидкости [12].

В качестве начальных условий исследования были выбраны параметры близкие к параметрам электроразрядного оборудования для интенсификации добычи нефти [5-7]. Это позволит определить амплитуду волны давления около стенки скважины, что может быть использовано при дальнейшем исследовании волновых процессов в горной породе околоскважинной области:

- емкость конденсаторной батареи 2,324 мкФ;
- индуктивность разрядного контура, как и в работе [16], принималось два значения 0,9 мкГн и 4 мкГн;
- зарядное напряжение 30 кВ. При расчетах принимались 10% потери энергии на предпробивной стадии, соответственно напряжение пробоя $\approx 28,5$ кВ;
- сопротивление разрядного контура 0,08 Ом;
- длина межэлектродного промежутка 0,025 м;
- расстояние от канала разряда до расчетной точки 0,06 м.

Полученные расчетным путем, результаты были сравнены с экспериментальными данными [16].

Полученные результаты расчета и экспериментальные данные [16] приведены в таблице 1. Здесь же представлено и отклонение результатов расчета от экспериментальных данных, рассчитанных по выражению

$$\Delta P = ((P_{max_{\text{э}}} - P_{max_{\text{р}}}) / P_{max_{\text{э}}}) \cdot 100\%, \quad (17)$$

где $P_{max_{\text{э}}}$ - экспериментально полученная амплитуда волны давления, МПа; $P_{max_{\text{р}}}$ - амплитуда волны давления, полученная расчетным путем, МПа.

Таблица 1 - Сравнение различных методик определения амплитуды волны давления при электрическом разряде в жидкости на расстоянии 0,06 м от источника

	L, мкГн	P_{max} , МПа	ΔP , %
Математическая модель (1-5)	0,9	41,61	-11,55
	4	24,71	23,02
Полуэмпирическая методика (6)	0,9	72,61	-94,66
	4	37,76	-17,63
Расчет по выражению (10)	0,9	79,17	-112,25
	4	37,55	-16,98
Экспериментальные данные [16]	0,9	37,3	
	4	32,1	

Анализируя данные, представленные в таблице 1, видно, что все расчетные методики показывают удовлетворительное совпадение результатов расчета и экспериментальных данных при исследовании режима с индуктивностью 4 мкГн.

Уменьшение индуктивности при неизменности остальных параметров, ожидается приводит к росту амплитудного значения генерированной волны давления. В то же время на режиме с малой индуктивностью (0,9 мкГн) удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными наблюдается только при использовании системы уравнений (1-5), другие рас-

четные методики показали отклонение от экспериментальных результатов до 2 раз. Полученный результат удовлетворительно согласуется с данными приведенными авторами полуэмпирической методики (6) в [12]. Там ими было показано, что на режимах с малой индуктивностью (в работе [12] - 0,8 мкГн) наблюдается большее отклонение от экспериментальных результатов, чем на режимах с большей индуктивностью (в работе [12] авторами приведены данные для режимов с индуктивностью от 2,25 мкГн до 15 мкГн).

Выводы. В данной работе был выполнен обзор некоторых существующих методов расчета параметров волны давления, генерированной электрическим разрядом в жидкости применительно к электроразрядной технологии интенсификации добычи нефти. Он показал разнообразие существующих методик: применяются методы математического моделирования, полуэмпирические и эмпирические методики. По результатам анализа для дальнейшего анализа были выбраны система дифференциальных уравнений, полуэмпирическая расчетная методика и аналитическое выражение, которые в отличие от эмпирических методов расчета носят более универсальный характер и не требуют проведение дополнительных исследований для определения эмпирических коэффициентов.

Сравнение выбранных расчетных методик с экспериментальными данными показало удовлетворительное совпадение на режиме с индуктивностью разрядного контура 4 мкГн. Одновременно с этим на режиме 0,9 мкГн наблюдается несовпадение результатов расчета по полуэмпирической методике и аналитическому выражению с результатами эксперимента (до 2 раз), что говорит о необходимости проведения дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вовченко, А.И. 50-летний путь развития: теория и практика электроразрядных процессов / А.И. Вовченко // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XVI Международной научной конференции, 19 августа - 22 августа 2013 г. - Николаев: КП "Миколаївська обласна друкарня", 2013. - С. 3-6.
2. Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов / В.И. Курец, М.А. Соловьев, А.И. Жучков [и др.]. - Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2012. - 272 с.
3. Кудимов, Ю.Н. Электроразрядные процессы в жидкости и кинетика экстрагирования биологически активных компонентов Часть 1. Ударные волны и кавитация / Ю.Н. Кудимов, В.Т. Казуб, Е.В. Голов // Вестник ТГТУ. - 2002. - № 8(2). - С. 253-264.
4. Кривицкий, Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости / Е.В. Кривицкий. - Киев: Наукова думка, 1986. - 208 с.
5. Электроразрядная обработка скважин на нефтедобывающих месторождениях Украины / В.Г. Жекул, В.А. Кучернюк, Ю.И. Мельхер [и др.] // Вестник НТУ "ХПИ": Сборник научных трудов: Техника и электрофизика высоких напряжений / НТУ "ХПИ". - Харьков, 2012. - Вып.21. - С. 72-77.
6. 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. - Днепрпетровск, 2014. - Вып. 114. - С. 132 - 141.
7. Сизоненко, О. Н. Электроразрядный метод воздействия на структуру пористых материалов / О. Н. Сизоненко. - Киев: НПП "Интерсервис", 2015. - 300 с.
8. Наугольных, К. А. Электрические разряды в воде / К. А. Наугольных, Н. А. Рой. - Москва: Наука, 1971. - 155 с.
9. 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.

10. Лепендин, Л.Ф. Акустика/ Л.Ф. Лепендин. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.

11. Кривицкий, Е.В. Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде / Е. В. Кривицкий, В.В. Шамко. - Киев: Наукова думка, 1979. - 208 с.

12. 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).

13. Гулый, Г.А. Основы разрядноимпульсных технологий / Г.А. Гулый. - Киев: Наукова думка, 1990. - 208 с.

14. Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves / G. Touya, T. Reess, L. Pécastaing [and etc.] // *Journal de Physique D: Applied Physics*. - 2006. - 39. - P. 5236–5244.

15. Study of the Electrical Characteristics, Shock-Wave Pressure Characteristics, and Attenuation Law Based on Pulse Discharge in Water / Dong Yan, Decun Bian, Jinchang Zhao [and etc.] // *Shock and Vibration*. - 2016. - 2016. - Article ID 6412309, 11 p. - doi:10.1155/2016/6412309

16. Экспериментальное исследование волн давления, генерированных электрическим взрывом в закрытом объеме жидкости / Смирнов А.П., Жекул В.Г., Мельхер Ю.И. [и др.]. // *Электронная обработка материалов*. - 2017. - № 53(4). - С. 47–52.

REFERENCES

1. Vovchenko, A.I. (2013), "The 50-year-old way of development: theory and practice of electrodischarge processes", *Fizika impulsnykh razryadov v kondensirovannykh sredakh: materialy XVI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (19-22 avgusta 2013)* [Physics of Pulse Discharges in Condensed Media": The materials XVI-th International Scientific Conference (August, 19-22, 2013)], Nikolaev, Ukraine, August, 2013, pp. 3-6.

2. Kurets, V.I., Solovyev, M.A., Zhuchkov, A.I. and Barskaya, A.V. (2012), *Elektrozaryadnye tekhnologii obrabotki i razrusheniya materialov* [Electrodischarge technologies for processing and destroying materials], Izdatelstvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, Tomsk, Russia.

3. Kudimov, Yu.N., Kazub, V.T. and Golov, E.V. (2002), "Electric Discharge Processes in Liquid and Extract Kinetics of Biologically Active Components of Biologically Active Components Part I. Shock Waves and Cavitation", *Transactions TSTU*, vol. 8, no. 2, pp. 253-264.

4. Krivitskiy, E. V. (1986), *Dinamika elektrozryva v zhidkosti* [Dynamics of electric explosion in a liquid], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

5. 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 nauchnykh 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.

6. 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.

7. Sizonenko, O. N. (2015), *Elektrozaryadnyy metod vozdeystviya na strukturu poristykh materialov* [Electrodischarge method impact on the structure of porous materials], Interservis, Kiev, Ukraine.

8. Naugolnyh, K. A. and Roy, N. A. (1971), *Elektricheskie razryady v vode* [Electrical discharges in water], Nauka, Moscow, Russia.

9. 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.

10. Lependin, L. F. (1978), *Akustika* [Acoustics], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.

11. Krivitskiy, E. V. and Shamko, V. V. (1979), *Perekhodnye protsessy pri vysokovoltnom razryade v vode* [Transient processes with high voltage discharge in water], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

12. 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.

13. Gulyj, G. A. (1990), *Osnovy razryadnoimpulsnykh tsehnologiy* [Fundamentals of discharge-pulse technologies], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

14. Touya, G., Reess, T., Pécastaing, L., Gibert, A. and Domens, P. (2006), "Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves", *Journal de Physique D: Applied Physics*, no. 39, pp. 5236–5244.

15. Dong Yan, Decun Bian, Jinchang Zhao, Shaoqing Niu (2016), "Study of the Electrical Characteristics, Shock-Wave Pressure Characteristics, and Attenuation Law Based on Pulse Discharge in Water", *Shock and Vibration*, vol. 2016, 11 p. doi:10.1155/2016/6412309.

16. Smirnov, A.P., Zhekul, V.G., Melkher, Yu.I., Taftai, E.I., Khvoshchan, O.V. and Shvets, I. S. (2017), "Experimental study of the pressure waves generated by an electrical explosion in a closed volume of fluid", *Elektronnaya obrabotka materialov*, vol.53, no.4, pp.47-52.

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, smirnovap1978@gmail.com.

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, smirnovap1978@gmail.com.

Анотація. В роботі виконано огляд розрахункових методик, які дозволяють визначити параметри хвилі тиску при електричному розряді у воді на деякій відстані від каналу розряду. Відзначено різноманітність використовуваних в науковій літературі підходів: математичне моделювання, емпіричні і напівемпіричні розрахункові моделі і вирази. При початкових умовах, які відповідають параметрам електророзрядного способу інтенсифікації видобутку нафти, виконано порівняння амплітудного значення хвилі тиску розрахованого при допомогою вибраних розрахункових методик з експериментальними даними. Відзначено, що при індуктивності розрядного контуру 4 мкГн спостерігається хороший збіг розрахункових і експериментальних даних. При малої індуктивності розрядного контуру (0,9 мкГн) відзначається розбіжність розрахункових результатів, отриманих за допомогою деяких методик, від даних фізичного експерименту.

Ключові слова: електричний розряд у рідині, хвиля тиску, амплітуда хвилі тиску.

Annotation. The research paper provides the review of calculation methods enabling to determine parameters of pressure wave at the electric discharge in water at a certain distance from the discharge channel. The variety of approaches used in scientific publications is considered: mathematical modeling, empirical and semi-empirical calculation models and expressions. Under initial conditions, which correspond to the parameters of electric discharge method of oil production intensification, value of the pressure wave amplitude calculated with the help of selected calculation techniques is compared with experimental evidence. It is noted that when the discharge circuit inductance is 4 μH , a good coincidence of the calculated and experimental data is observed. With a small inductance of the discharge circuit (0.9 μH), there is a discrepancy between the calculated results obtained with the help of certain techniques and the data obtained by physical experiment.

Keywords: electrical discharge in the fluid, pressure wave, amplitude of pressure wave.

Статья поступила в редакцию 27.10.2017

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