

Исследование полей давлений в водяной скважине при ее очистке от солевых отложений

А. П. Смирнов*, О. В. Хвощан, А. Н. Рачков, Т. Д. Денисюк

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина*

*e-mail: smirnovap1978@gmail.com

Поступила в редакцию 20.08.2024

После доработки 17.09.2024

Принята к публикации 22.09.2024

Исследованы поля давления в водяной скважине при ее очистке от солевых отложений с помощью электроразрядного оборудования с зарядно-разрядным устройством, расположенным на поверхности земли. Получены кривые пространственного распределения давления в водяной скважине, которые могут быть использованы для определения режимов обработки – количества точек обработки на 1 погонный метр скважины. Результаты показали сильное влияние электрических характеристик и длины высоковольтного кабеля, соединяющий наземную и погружную части, на эффективность очистки скважины. Предложены способы повышения эффективности воздействия.

Ключевые слова: водяная скважина, электрический разряд, очистка скважины, волна давления, амплитуда, электроразрядное оборудование

УДК 537.528: 626.811:628.112.2

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.5.43>

ВВЕДЕНИЕ

Подземные воды играют важную роль в обеспечении населения питьевой водой [1]. В европейских странах 75% бытового водоснабжения обеспечивается за счет подземных вод [2], а в Украине более 10% общего водоснабжения населения приходится на долю подземных вод, при этом есть все предпосылки для увеличения данного значения [3]. Основным способ добычи подземных вод – скважины, пробуренные с поверхности земли.

Со временем по мере эксплуатации водяных скважин происходит падение их дебита. Особенно остро эта проблема стоит для европейских и ряда азиатских стран. В Европе это в первую очередь связано со значительным увеличением среднего возраста водяных скважин и интенсивной эксплуатацией, которая приводит к ускорению их старения [4]. Например, в Нидерландах у большинства скважин за несколько лет эксплуатации наблюдалось снижение производительности до 50% от первоначального уровня [5]. В свою очередь в Южной Корее большое количество водяных скважин находятся в запущенном состоянии и требуют проведения восстановительных работ [6].

В реалиях современного мира, при постоянном росте промышленности и увеличении количества населения, необходимо не просто поддерживать, а желательно и увели-

чивать добычу воды. Для решения данной проблемы можно использовать два подхода [7] – экстенсивный и интенсивный. Экстенсивный путь увеличения добычи заключается в разведке, бурении и обустройстве как можно большего количества скважин. В свою очередь, интенсивный путь заключается в увеличении добычи на уже освоенных и обустроенных месторождениях за счет восстановления дебита старых скважин и применения различных методов интенсификации добычи. При выборе приоритетного пути необходимо учитывать, что восстановление старых скважин и применение методов интенсификации требует меньше времени и меньших материальных затрат, чем бурение новых скважин [8]. Это показывает преимущества интенсивного подхода, методы и технологии которого нашли широкое применение в мировой практике. Вышесказанное показывает, что разработка новых и повышение эффективности существующих методов восстановления и увеличения дебита уже пробуренных водяных скважин актуальны и имеют научное и практическое значение.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Одной из причин уменьшения дебита водяных скважин является их кольматация (загрязнение) различного рода отложениями [9–13]. Следует отметить, что загрязнение скважины также негативно сказывается на качестве добываемой воды [13].

В водяных скважинах одним из видов кольматажа являются неорганические соли [9, 10]. В результате солеобразования в скважинах происходит постепенное зарастание фильтра и прифильтровой зоны различными по физическим свойствам и химическому составу кольматирующими осадками, закупоривающими фильтрующие отверстия каркаса, сетчатую или провололочную обмотку, поровое пространство. В зависимости от условий формирования кольматирующий осадок может быть различной структуры – пастообразным, рыхлопористым, слабо- или прочносцементированным, однородным или конгломератоподобным, одно- или многокомпонентным [10].

Химико-минералогический состав кольматанта различается от скважины к скважине и зависит в первую очередь от условий окружающей среды. В [11, 12, 14, 15] отмечается, что в загрязнениях скважины встречаются карбонаты (например карбонат кальция), гидроксид железа, оксид марганца, а в [5] фиксируется наличие сульфида железа. Анализ научной литературы показал, что в состав кольматанта обычно входят следующие химические соединения: CaCO_3 , MgCO_3 , $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, SiO_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$, FeCO_3 , FeO_3 , $\text{Mn}(\text{OH})_4$, FeS , $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ [8, 10].

Для борьбы с солеотложением применяют различные методы, которые либо удаляют солевые отложения, либо предотвращают их образование [11, 16]. Среди методов удаления солевых отложений по способу воздействия можно выделить две большие группы – физические и химические [10, 11]. К физическим относятся различные способы механической и гидравлической очистки, импульсные, акустические методы и т.п. В основе химических методов лежит использование различных химических реагентов. В отдельную группу можно отнести физико-химические методы, которые являются комбинацией методов из первой и второй групп.

У каждого из методов интенсификации имеются свои достоинства и недостатки. При выборе метода необходимо учитывать совокупность множества факторов – глубину залегания продуктивного пласта, температуру и давление в зоне обработки, тип коллектора скважины, конструкцию скважины, экологическую чистоту метода и опыт его успешного применения.

Хорошую эффективность в борьбе с солевыми отложениями показали различные импульсные методы, которые относятся к группе физических и являются более экологически чистыми в сравнении с химическими. В основе данных методов лежит импульсное

воздействие на отложения в скважине, которое приводит к разрушению отложений и, соответственно, очистке скважины. Для данной группы методов необходимым условием разрушения хрупких кольматационных отложений (например, отложений неорганических солей) является превышение амплитудой падающей волны давления их предела прочности на сжатие.

В научной литературе встречаются разные диапазоны прочностей кольматирующих отложений в водозаборных скважинах. Так, в [10] указано, что для разрушения отложений в водяной скважине необходимы напряжения порядка 1–1,5 МПа. Авторы работы [9] указывают, что прочность сцементированных кольматирующими образованиями песков в прифильтровой зоне водозаборных скважин шириной до 0,5 м достигает 2 МПа. В работе [8] указан диапазон прочности кольматирующих отложений водозаборных скважин от 0,5 МПа до 3 МПа. В [17] величина давления, равная 3 МПа, была взята в качестве минимального давления в волне сжатия, которое обеспечивает разрушение всех кольматирующих отложений в водяных скважинах.

Один из наиболее ранних импульсных методов удаления хрупких солевых отложений – это использование взрывчатых веществ (ВВ). Правильно подобранный режим взрыва ВВ обеспечивает ударные нагрузки, которые удаляют солевые отложения в скважинах [16]. Однако применение ВВ имеет свои недостатки – плохая управляемость процессом обработки, необходимость специального разрешения для работы с ВВ, одноразовость процесса взрыва. Одной из альтернатив ВВ является импульсный высоковольтный электрический разряд в жидкости – пробой жидкого промежутка между электродами (анодом и катодом) в результате подачи на анод высоковольтного напряжения. В процессе электрического разряда в определенном объеме (канале разряда) в течение малого промежутка времени образуется высокая плотность энергии, резко повышается давление и температура, происходит быстрое расширение канала разряда, в результате чего во внешнюю среду излучается волна давления [18].

Существует целый ряд работ, которые посвящены использованию электрического разряда для очистки нефтяных [19–24] и водозаборных [6, 25, 26] скважин.

Непосредственно для декольматации водяных скважин может быть использовано два вида оборудования. В [7] описано существующее погружное электроразрядное оборудование, которое эффективно используется для декольма-

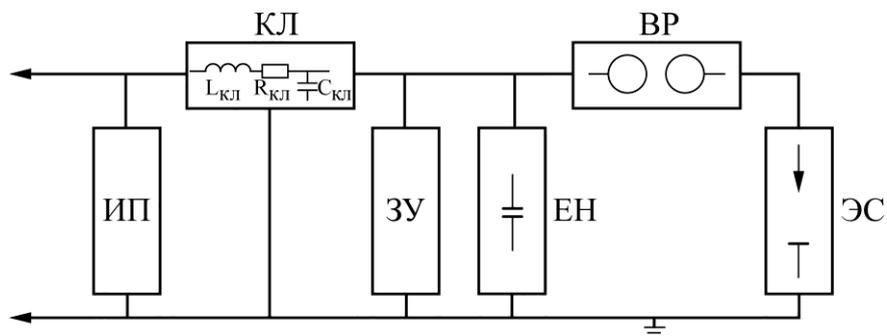


Рис. 1. Принципиальная схема погружного электроразрядного устройства для декольматации скважин: ИП – источник питания на поверхности земли; КЛ – кабельная линия; ЗУ – высоковольтное зарядное устройство; ЕН – емкостный накопитель; ВР – воздушный разрядник; ЭС – электродная система.

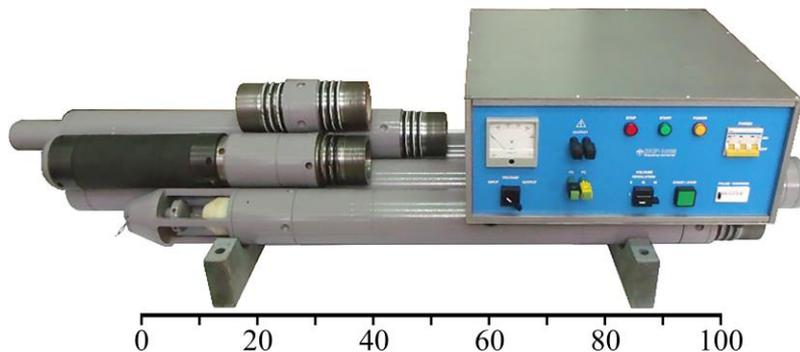


Рис. 2. Внешний вид погружного электроразрядного устройства для декольматации скважин.

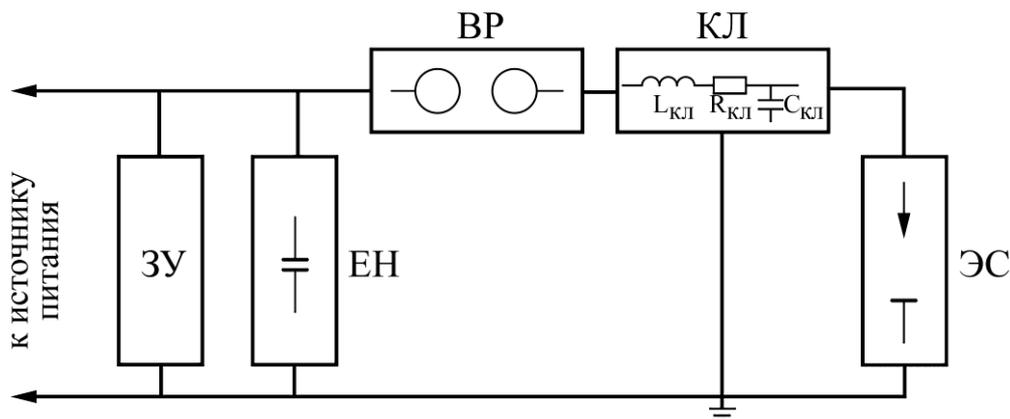


Рис. 3. Принципиальная схема электроразрядного устройства для декольматации скважин с зарядно-разрядным устройством на поверхности земли: КЛ – кабельная линия; ЗУ – высоковольтное зарядное устройство; ЕН – емкостный накопитель; ВР – воздушный разрядник; ЭС – электродная система.

тации преимущественно нефтяных скважин. Его принципиальная схема приведена на [рис. 1](#), а внешний вид – на [рис. 2](#). Особенностью данного устройства является погружение в скважину всего высоковольтного зарядно-разрядного контура (на поверхности расположен только источник питания для высоковольтного контура) с целью уменьшения в нем потерь электрической энергии и достижения на объекте обработки амплитуд давлений величиной в десятки мегапаскалей. Данная конфигурация устройства позволяет обрабатывать глубокие (до 5 км) скважины.

Второй вид – оборудование с зарядно-разрядным устройством (включает в себя высоковольтное зарядное устройство, емкостный

накопитель, воздушный разрядник), расположенным на поверхности земли и с передачей импульсного высокого напряжения по кабельной линии на электродную систему (ЭС) диаметром 0,1 м, погруженную в скважину. Принципиальная схема оборудования, разработанного в ИИПТ НАН Украины, приведена на [рис. 3](#), а его внешний вид представлен на [рис. 4](#). В данном случае потери энергии в высоковольтном кабеле приводят к снижению величины генерируемого в зоне обработки давления [19, 25]. В отличие от погружного исполнения при наземном размещении высоковольтной части:

– повышается надежность работы устройства за счет упрощения конструкции его погружной части;



Рис. 4. Внешний вид электроразрядного оборудования для декольматации скважин с зарядно-разрядным устройством на поверхности земли: (а) – зарядное устройство; (б) – электродная система.

– появляется возможность оперативного управления режимами обработки без подъема высоковольтного оборудования из скважины;

– за счет уменьшения массогабаритных характеристик погружной части упрощается сам процесс обработки (например, отсутствует необходимость в подъемном кране).

Это позволяет эффективно применять данное оборудование для обработки водяных скважин глубиной до 200 м и диаметром в зоне обработки 0,12 м и более. В данной работе будет рассматриваться именно такой вид оборудования.

В настоящее время проведено большое количество работ по исследованию применения электрического разряда для очистки скважин, в том числе генерируемой при этом волны давления, которая является основным фактором воздействия данной технологии [19, 20, 27–29]. В большинстве работ рассматривалось распространение волны давления в экваториальной плоскости к каналу разряда [27, 29], в которой амплитуда волны давления максимальна (P_{M0}). При этом не уделялось внимания исследованию изменения амплитуд волн давления по мере удаления от экваториальной плоскости. Получение полной волновой картины позволит определить зону разрушения хрупких солевых отложений на стенке скважины и повысить эффективность электроразрядного способа декольматации скважин.

Поэтому цель данной работы – исследовать пространственное распределение давления в

водяной скважине при электроразрядном способе ее очистки от солевых отложений.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Расчетная схема для математического моделирования приведена на рис. 5. При электрическом разряде в воде максимальная амплитуда давления (P_{M0}) наблюдается в экваториальной плоскости к каналу разряда (OB). При удалении от экваториальной плоскости (AB) амплитуда волны давления будет становиться меньше по мере увеличения расстояния Y .

Для определения полей давления может быть применена математическая модель из работы [27]. Процессы в разрядном контуре и канале разряда описывают уравнения [30]: уравнение баланса напряжений в разрядном контуре (1); уравнение баланса энергии (2); уравнение гидродинамики, определяющей связь давления в канале разряда с кинематическими характеристиками его контактной границы (3); уравнение (4), которое определяет связь между сопротивлением канала разряда и удельной электропроводностью плазмы. Для описания распространения волны давления в жидкости используется двумерное волновое уравнение (5) [31].

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

где $I = dq_s / dt$.

$$\frac{d(p_k S_k)}{dt} \frac{1}{\gamma - 1} + p_k \frac{dS_k}{dt} = I^2 R_k \frac{1}{l}, \quad (2)$$

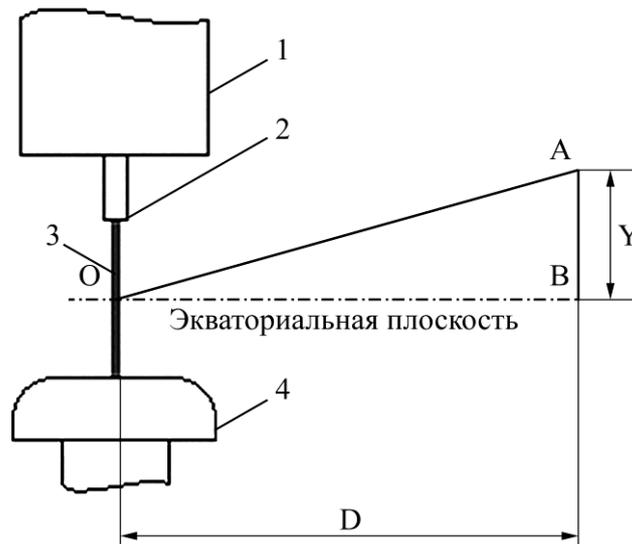


Рис. 5. Пространственная схема распространения волны давления при электрическом разряде: 1 – изолятор; 2 – анод; 3 – канал разряда; 4 – катод; D – расстояние от канала разряда в экваториальной плоскости, м; Y – расстояние по вертикали от экваториальной плоскости канала разряда до рассматриваемой точки А, м.

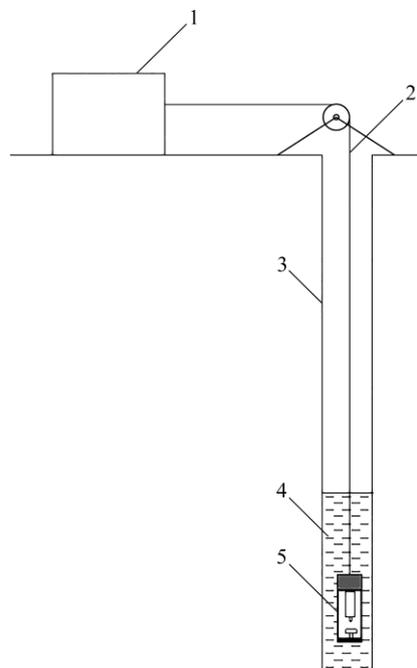


Рис. 6. Схема обработки водяной скважины электроразрядным оборудованием с зарядно-разрядным устройством на поверхности земли: 1 – высоковольтное оборудование (наземная часть); 2 – высоковольтный кабель; 3 – скважина; 4 – скважинная жидкость; 5 – электродная система (погружная часть).

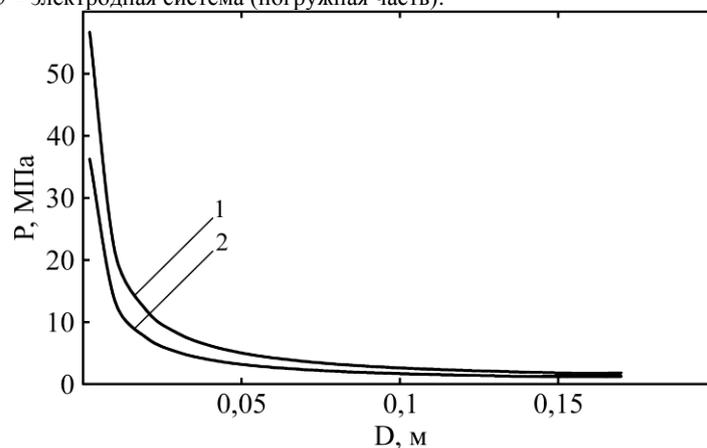


Рис. 7. Амплитуда волны давления в экваториальной плоскости к каналу разряда по мере удаления от источника возмущения (кабель № 1): 1 – длина кабеля 100 м; 2 – длина кабеля 200 м.

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

$$R_k = \frac{Al(\gamma-1)}{p_k S_k}. \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r_d^2} + \frac{1}{r_d} \frac{\partial \varphi}{\partial r_d} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}. \quad (5)$$

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_k – сопротивление канала разряда, Ом; $R_{кн}$ – сопротивление шин разрядного контура, Ом; q_3 – электрический заряд, Кл; l – расстояние между электродами, м; p_k – давление в канале разряда, Па; S_k – 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 $A = 10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с} / \text{м}^2$), В²·с·м⁻²; t – время, с; φ – потенциал скоростей движения жидкости, м²/с; r_d, z – пространственные координаты, м; c_s – скорость звука в скважинной жидкости, м/с.

Связь давления в жидкости с потенциалом скорости определяется выражением:

$$P = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (6)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; P – давление в жидкости, Па.

Для решения системы уравнений (1)–(4) использовался метод Эйлера–Коши, для решения волнового уравнения (5) – метод явного «креста».

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже отмечалось выше, в данной работе рассматривалось электроразрядное оборудование для декольматации водяных скважин с зарядно-разрядным устройством, расположенным на поверхности земли (рис. 4). Для данного случая краткий алгоритм обработки следующий (рис. 6): в скважину 3 на глубину обработки опускается погружная часть устройства – электродная система 5. На нее по кабельной линии 2 с наземной части устройства 1 подается высокое напряжение, в результате чего происходит электрический разряд с генерацией волны давления. Осуществляется серия разрядов в скважинной жидкости 4, которая приводит к разрушению и удалению отложений в ближней зоне скважины. По окончании серии электродная

система поднимается на некоторое расстояние, и снова осуществляется серия разрядов. Такой алгоритм повторяется до тех пор, пока не будет обработана вся продуктивная зона скважины.

Исходя из схем на рис. 4 и 6 при выполнении расчетов должны учитываться индуктивность и сопротивление высоковольтного кабеля, соединяющего наземную часть с электродной системой.

Для подобного случая в [25] предлагается суммировать сопротивление и индуктивность высоковольтного кабеля с идентичными параметрами разрядного контура наземного высоковольтного оборудования:

$$R_T = R_c + R_e, \quad (7)$$

$$L_T = L_c + L_e, \quad (8)$$

где R_T, L_T – суммарные сопротивление и индуктивность, которые будут приняты в расчетах; R_c, L_c – сопротивление и индуктивность кабельной линии; R_e, L_e – сопротивление и индуктивность высоковольтного оборудования.

Первоначально было принято:

– сопротивление 1 метра кабельной линии $R_{lc} = 0,002$ Ом, индуктивность 1 м кабельной линии $L_{lc} = 0,25$ мкГн (что близко к параметрам существующих высоковольтных кабелей, далее – кабель № 1). В расчетах принята длина кабеля 200 и 100 м; $R_e = 0,08$ Ом; $L_e = 1$ мкГн.

Энергетические параметры установки принимались следующими: зарядное напряжение обеспечивает пробой межэлектродного промежутка при $U_b = 25$ кВ, емкость конденсаторной батареи $C = 3,5$ мкФ, длина межэлектродного промежутка 0,02 м, энергия воздействия $W_d = CU_b^2/2 = 1094$ Дж.

Результаты расчетов амплитуды волны давления в экваториальной плоскости сечения (ОВ, рис. 5) скважины приведены на рис. 7.

Анализ литературы показал, что минимальное давление, которое обеспечивает разрушение кольматанта в водяных скважинах, 2–3 МПа. Данные, приведенные на рис. 7, показывают, что для кабеля №1 длиной 100 м давление 3 МПа в экваториальной плоскости наблюдается на расстоянии 0,085 м от источника возмущения ($D = 0,085$ м), а 2 МПа – на $D = 0,137$ м. В случае увеличения длины кабеля до 200 м: 3 МПа – на $D = 0,05$ м, а 2 МПа – на $D = 0,082$ м.

При электроразрядном способе разрушение кольматирующих отложений также происходит в вертикальной плоскости, расположенной по нормали к экваториальной плоскости к каналу разряда. На рис. 8 приведено распределение максимального давления (без учета взаимодей-

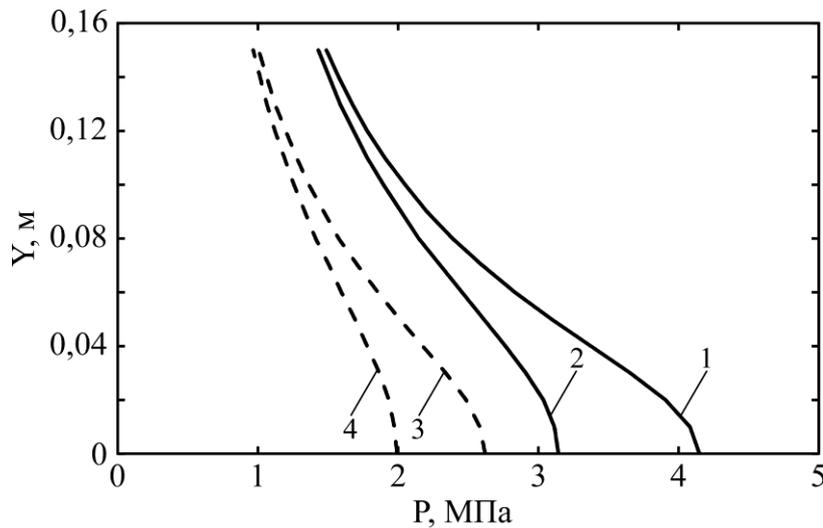


Рис. 8. Распределение максимального давления по нормали к экваториальной плоскости к каналу разряда (кабель № 1): 1 – длина кабеля 100 м, $D = 0,06$ м; 2 – длина кабеля 100 м, $D = 0,08$ м; 3 – длина кабеля 200 м, $D = 0,06$ м; 4 – длина кабеля 200 м, $D = 0,08$ м.

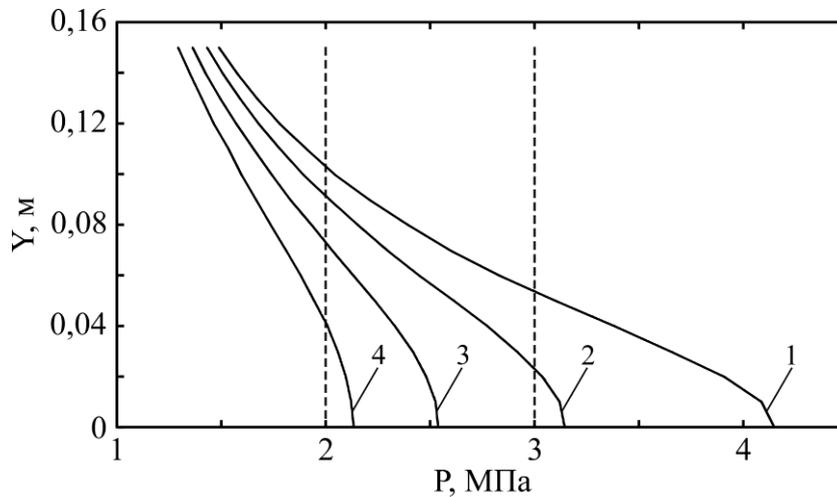


Рис. 9. Распределение максимального давления по нормали к экваториальной плоскости к каналу разряда при длине кабеля 100 м (кабель № 1): 1 – $D = 0,06$ м; 2 – $D = 0,08$ м; 3 – $D = 0,1$ м; 4 – $D = 0,12$ м.

ствия волна давления–твёрдая поверхность) по нормали к экваториальной плоскости при $D = 0,06$ м и $D = 0,08$ м для длины кабеля 100 и 200 м соответственно.

Полученные результаты показали, что с удалением от экваториальной плоскости давление уменьшается. При этом чем дальше от канала разряда находится точка в экваториальной плоскости, тем менее выражена разница между давлением в экваториальной плоскости и на некотором удалении от нее. Более ярко это выражено на графиках, которые приведены на рис. 9. Так, на $D = 0,06$ м давление на удалении 0,15 м от экваториальной плоскости к каналу разряда меньше в 2,8 раза, чем непосредственно на экваториальной плоскости. На расстоянии по экватору 0,12 м при прочих подобных условиях давление меньше в 1,6 раза.

Графики, приведенные на рис. 9, позволяют определить необходимое количество точек обработки скважины электроразрядным оборудова-

нием на 1 м скважины по вертикали в зависимости от прочности отложений и ее диаметра. Например, для $D = 0,06$ м (что соответствует диаметру скважины 0,12 м, см. рис. 5) примерная зона разрушений отложений прочностью 2 МПа – 0,1 м в одну сторону по нормали к экваториальной плоскости. С учетом симметрии полная зона разрушений – 0,2 м. Для отложений прочностью 3 МПа – $0,055 \times 2 = 0,11$ м. Соответственно, в первом случае будет достаточно 5 точек обработки на 1 м стенки скважины, а во втором необходимо 9 точек.

Результаты на рис. 7 и 8 подтверждают, что на параметры генерированной волны давления, а соответственно, и на эффективность воздействия сильное влияние оказывают электрические характеристики кабеля и его длина. Для повышения эффективности воздействия можно рекомендовать:

а) при обработке скважины использовать кабели с минимально возможной длиной. Для

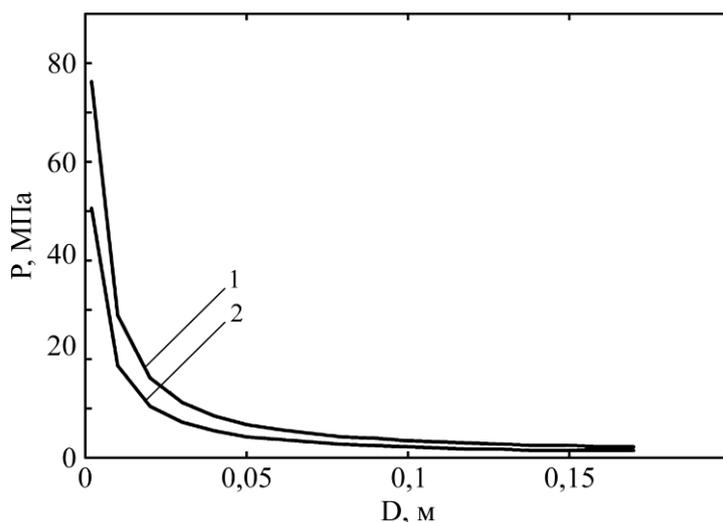


Рис. 10. Амплитуда волны давления в экваториальной плоскости к каналу разряда по мере удаления от источника возмущения (кабель № 2): 1 – длина кабеля 100 м; 2 – длина кабеля 200 м.

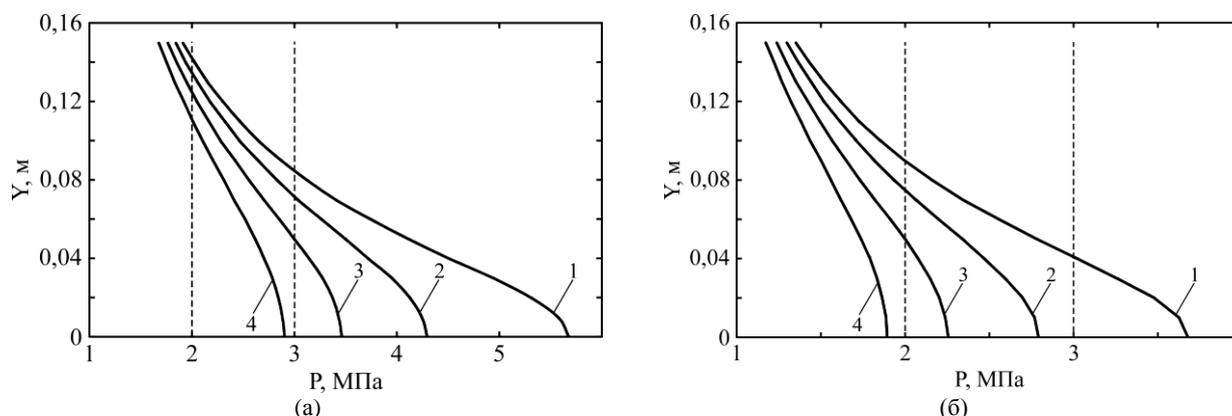


Рис. 11. Распределение максимального давления по нормали к экваториальной плоскости к каналу разряда кабеля № 2 ((а) – длина 100 м; (б) – длина 200 м): 1 – $D = 0,06$ м; 2 – $D = 0,08$ м; 3 – $D = 0,1$ м; 4 – $D = 0,12$ м.

этого необходимо иметь несколько комплектов кабелей, например, длиной 50, 100, 150, 200 м;

б) использовать высоковольтные кабели с минимальными значениями погонной индуктивности и сопротивления;

в) повысить энергию воздействия (W_d);

г) в случае скважин больших диаметров обработку проводить при максимально возможном приближении электродной системы к стенке скважины.

Анализ варианта (а) был выполнен выше.

Для варианта (г) максимально возможное приближение канала разряда к стенке скважины составляет порядка 0,06 м: внешний диаметр погружной части устройства 0,1 м, но необходим зазор между ЭС и стенкой скважины 0,01 м для исключения повреждения как самой ЭС, так и скважинной оснастки. Расчеты распределения давления при $D = 0,06$ м также рассматривались в данной работе.

Варианты (б) и (в) будут проанализированы ниже.

Был выполнен расчет для случая использования высоковольтного кабеля с $R_{lc} = 0,0004$ Ом, $L_{lc} = 0,15$ мкГн (кабель № 2). Результаты приведены на рис. 10 и 11.

Использование кабеля № 2 позволяет увеличить в экваториальной плоскости к каналу разряда расстояние, на котором возможна эффективная обработка (рис. 10): при длине кабеля 100 м давление 3 МПа можно наблюдать на $D = 0,121$ м от источника возмущения, а 2 МПа – на расстоянии $D = 0,195$ м. В случае длины кабеля 200 м: 3 МПа – на $D = 0,074$ м, а 2 МПа – на $D = 0,012$ м. Эти показатели примерно в 1,4 раза больше, чем при применении кабеля № 1 (рис. 7).

Распределение максимального давления в вертикальной плоскости по мере удаления от экваториальной плоскости к каналу разряда приведено на рис. 11.

Сравнение рис. 9 и 11а показывает, что использование кабеля № 2 позволяет увеличить зону эффективной обработки, тем самым снизив количество точек воздействия на 1 погонный метр скважины. Так, для скважины диаметром 0,12 м примерная зона разрушений отложений прочностью 2 МПа – $0,143 \times 2 = 0,286$ м. Для отложений прочностью 3 МПа – $0,085 \times 2 = 0,17$ м. Соответственно, в первом случае будет

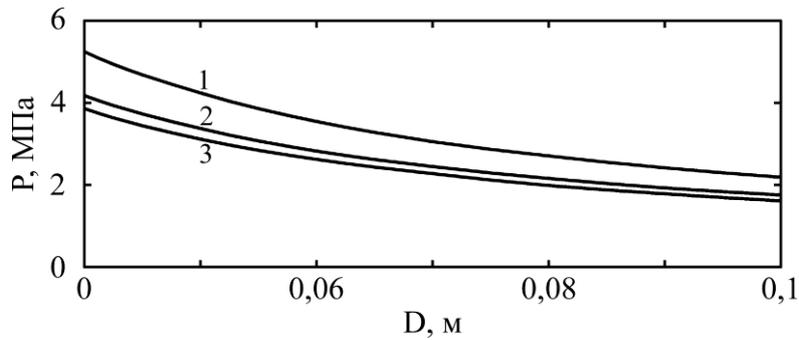


Рис. 12. Амплитуда волны давления в экваториальной плоскости к каналу разряда по мере удаления от источника возмущения (кабель № 1, длина кабеля 200 м): 1 – $U_b = 35$ кВ, $C = 3,5$ мкФ; 2 – $U_b = 25$ кВ, $C = 7$ мкФ; 3 – $U_b = 25$ кВ, $C = 3,5$ мкФ.

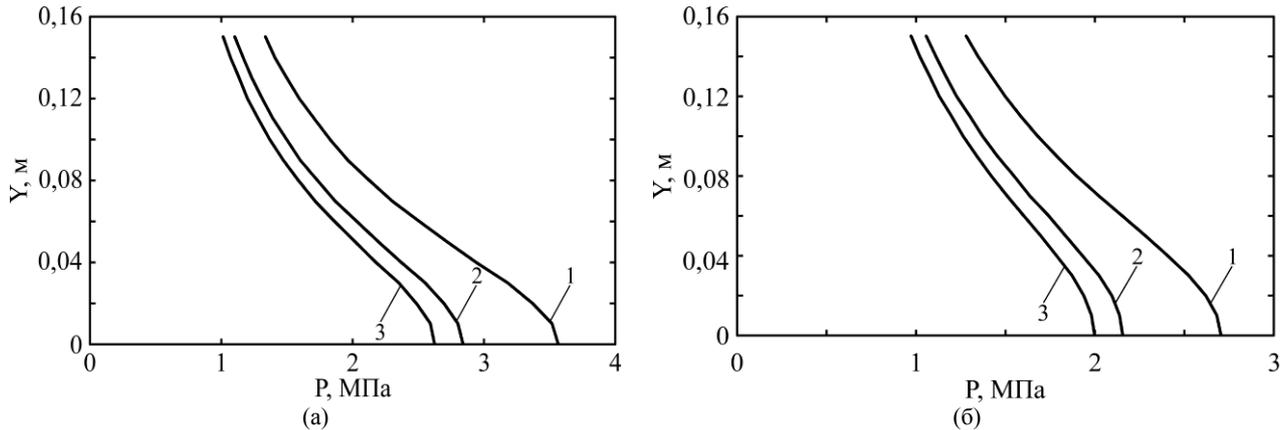


Рис. 13. Распределение максимального давления по нормали к экваториальной плоскости к каналу разряда на $D = 0,06$ м (а) и $D = 0,08$ м (б) (кабель № 1, длина кабеля 200 м): 1 – $U_b = 35$ кВ, $C = 3,5$ мкФ; 2 – $U_b = 25$ кВ, $C = 7$ мкФ; 3 – $U_b = 25$ кВ, $C = 3,5$ мкФ.

достаточно 4 точки обработки на 1 м, а во втором необходимо 6 точек.

Конструкционные особенности электроразрядного оборудования с наземным размещением зарядно-разрядного устройства позволяют оперативно управлять энергией воздействия за счет присоединения дополнительной емкости конденсаторов или увеличения зарядного напряжения (что приводит к увеличению напряжения пробоя). На рис. 12 и 13 приведены расчетные кривые распределения давления в скважине при увеличении энергии за счет присоединения дополнительных конденсаторов ($C = 7$ мкФ, $U_b = 25$ кВ, $W_d = 2187,5$ Дж) или увеличения зарядного напряжения и, соответственно, напряжения пробоя ($C = 3,5$ мкФ, $U_b = 35$ кВ, $W_d = 2143,7$ Дж). Анализ полученных результатов показывает, что для повышения эффективности воздействия электроразрядного оборудования декольматации водяных скважин от солевых отложений более целесообразно увеличивать энергию воздействия за счет повышения напряжения.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволили получить пространственное распределение давления в водяной скважине при электроразрядном

способе ее очистки от солевых отложений с наземным расположением высоковольтного оборудования. Отмечено, что сильное влияние на эффективность данного способа оказывают параметры высоковольтного кабеля, который соединяет наземную и погружную части, а именно его электрические характеристики и длина. Для повышения эффективности воздействия можно предложить:

- при обработке скважины использовать кабели с минимально возможной длиной. Для этого в комплекте оборудования необходимо иметь несколько кабелей, например, длиной 50, 100, 150, 200 м;

- использовать высоковольтные кабели с минимальными значениями погонной индуктивности и сопротивления;

- в случае скважин больших диаметров их обработку проводить при максимально возможном приближении (0,06 м) канала разряда к стенке скважины;

- повысить энергию воздействия, при этом лучшим вариантом является повышение величины зарядного напряжения.

Полученные в работе графики распределения максимального давления по мере удаления от экваториальной плоскости к каналу разряда могут быть использованы для определения

режимов обробки, а именно количества точек обробки на 1 погонный метр скважины.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kees, Van Beek, Rob, Breedveld, Pieter, Stuyfzand, Preventing two types of well clogging, *Ameri. Water Works Assoc.*, 2009, vol. 101, no. 4, p. 125. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2009.tb09880.x>
2. Shahbaz, Akhtar, M., Nakashima, Y. and Nishigaki, M., Clogging mechanisms and preventive measures in artificial recharge systems, *J. Groundwater Sci. Eng.*, 2021, vol. 9, no. 3, p. 181. <https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2021.03.002>
3. Томільцева, А.І., Яцик, А.В., Мокін, В.Б., *Екологічні основи управління водними ресурсами*. Київ: Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 200 с.
4. Kahuda, D., Pech, P., Ficaj, V. and Pechová, H., Well rehabilitation via the ultrasonic method and evaluation of its effectiveness from the pumping test, *Coatings*, 2021, vol. 11, art. ID 1250. <https://doi.org/10.3390/coatings11101250>
5. Harrie, Timmer, Jan-Dik, Verdel and Antoine, G. Jongmans, Well clogging by particles in Dutch well fields, *Amer. Water Works Assoc.*, 2003, vol. 95, no. 8, p. 112. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2003.tb10434.x>
6. Kyoung-Jae, Chung, Seok-geun, Lee, Jeong-Jeung, Dang, Gil-Hwan, Choi, et al., Feasibility study for the cleaning of well screens using high-voltage pulsed discharge, *J. Eng. Geol.*, 2013, vol. 23, no. 1, p. 29. <https://dx.doi.org/10.9720/kseg.2013.1.29>
7. Жекул, В.Г., Литвинов, В.В., Мельхер, Ю.И., Смирнов, А.П., и др., Погружные электроразрядные установки для интенсификации добычи полезных ископаемых, *Нафтогазова енергетика*, 2017, т. 27, № 1, с. 23.
8. Романенко, В.А., *Восстановление производительности водозаборных скважин*. Л.: Недра, 1986. 112 с.
9. Гаврилко, В.М., Алексеев, В.С., *Фильтры буровых скважин*. М.: Недра, 1985. 334 с.
10. Башкатов, Д.Н., Драхлис, С.Л., Сафонов, В.В., Квашнин, Г.П., *Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду*. М.: Недра, 1988. 268 с.
11. Martin, R., Clogging remediation methods to restore well injection capacity. In: *Clogging Issues Associated with Managed Aquifer Recharge Methods*. Martin R. (ed.). IAH Commission on Managing Aquifer Recharge. p. 207–211. https://recharge.iah.org/files/2015/03/Clogging_Mono_graph.pdf
12. Van Beek, C.G.E.M., Breedveld, R.J.M., Juhász-Holterman, M., Oosterhof, A., et al., Cause and prevention of well bore clogging by particles, *Hydrogeology J.*, 2009, vol. 17, p. 1877. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0537-9>
13. Jeong-Hwan, Lee, Se-Yeong, Hamm, Suk-Jong, Han, Soon-Il, Ok, et al., Verifying rehabilitation and evaluation of bedrock wells using air-brush surging and explosive methods, *J. Eng. Geol.*, 2011, vol. 21, no. 4, p. 369. <https://doi.org/10.9720/kseg.2011.21.4.369>
14. Houben, G.J., The influence of well hydraulics on the spatial distribution of well incrustations, *Ground Water*, 2006, vol. 44, no. 5, p. 668. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00216.x>
15. Hoon, Young, Jeong, Seong-Chun, Jun, Jeong-Yong, Cheon and Minji Park, A review on clogging mechanisms and managements in aquifer storage and recovery (ASR) applications, *Geosci. J.*, 2018, vol. 22, no. 4, p. 667. <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0073-x>
16. Crabtree, M., Eslinger, D., Fletcher, P., Miller, M., et al., Fighting scale - removal and prevention. *Oilfield Rev.*, 1999, vol. 11, no. 3, p. 30.
17. Лесной, В.И., Нездойминов, В.И., Дмитров, П.А., Основные параметры воздействия пневмовзрыва на фильтр и прифильтровую область водозаборной скважины, *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*, 2013, т. 5(103), с. 130.
18. Кривицкий, Е.В., Шамко, В.В., *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наукова думка, 1979. 208 с.
19. Kern Lee, Kyoung-Jae, Chung, Hwang, Y.S. and Kim, C.Y., Underwater spark discharge with long transmission line for cleaning horizontal wells, *J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 121, no. 24, art. ID 243302. <https://doi.org/10.1063/1.4986634>
20. Bian, D.C., Yan, D., Zhao, J.C. and Niu, S.Q., Experimental study of pulsed discharge underwater shock-related properties in pressurized liquid water, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 2018, art. ID 8025708. <https://doi.org/10.1155/2018/8025708>
21. Smirnov, A.P., Zhekul, V.G. and Poklonov, S.G., The influence of the hydrostatic pressure on the parameters of a pressure wave generated by an electric discharge in a fluid, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2014, vol. 50, no. 3, p. 233. <https://doi.org/10.3103/S1068375514030077>
22. Yan, Bingnan, Zhou, Jing, Zhao, Liang, Liu, Chongxin, et al., Experimental study on the discharging characteristics of pulsed high-voltage discharge technology in oil plug removal, *J. Power Technol.*, 2016, vol. 96, no. 4, p. 261.
23. Хвощан, О.В., Смирнов, О.П., Залежність енергетичних процесів високовольтних электроразрядних свердловинних комплексів "СКІФ" від характеристик навантаження, *Технічна електродинаміка*, 2022, № 1, с. 58. <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.058>

24. Malyushevskii, P.P. and Malyushevskaya, A.P., Revisiting the mechanism of electrodischarge stimulation of fluid inflow into wells, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2014, vol. 50, no. 6, p. 518.
25. Kyoung-Jae, Chung, Seok-geun, Lee, Hwang, Y.S. and Kim, C.Y., Modeling of pulsed spark discharge in water and its application to well cleaning, *Curr. Appl. Phys.*, 2015, vol. 15, no. 9, p. 977. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.05.010>
26. Швець, І.С., Жекул, В.Г., Поклонов, С.Г., Смірнов, О.П., и др., Електророзрядний спосіб відновлення продуктивності артезіанських свердловин, *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, 2013, № 3, с. 200.
27. Smirnov, A.P., Kosenkov, V.M., Zhekul, V.G. and Poklonov, S.G., The study of the effect of the electrodischarge action modes on viscous deposits in cylindrical channels, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2010, vol. 46, no. 3, p. 237. <https://doi.org/10.3103/S1068375510030087>
28. Zhekul, V.G., Poklonov, S.G. and Smirnov, A.P., Experimental studies of the effectiveness of the electrodischarge effect on a physical model of the bottom hole zone of the productive layer, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2011, vol. 47, no. 1, p. 89. <https://doi.org/10.3103/S1068375511010200>
29. Smirnov, A.P., Zhekul, V.G., Taftai, E.I., Khvoshchan, O.V., et al., Effect of parameters of liquids on amplitudes of pressure waves generated by electric discharge, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 1, p. 84. <https://doi.org/10.3103/S1068375519010149>
30. Кривицкий, Е. В., *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
31. Свердлин, Г.М., *Прикладная гидроакустика*. Л.: Судостроение, 1990. 320 с.

Summary

The paper deals with the pressure fields in a water well during its cleaning from salt deposits using electric discharge equipment with the location of the charging and discharging device on the Earth surface. The curves of the spatial pressure distribution in a water well were obtained. Those graphs could be used to determine the processing modes, namely the number of processing points per 1 linear meter of the well. The results obtained showed a strong influence on the cleaning efficiency of the parameters of the high-voltage cable that connects the surface and submersible parts (electrical characteristics of the cable and its length). Methods to increase the efficiency of the impact are proposed.

Keywords: water well, electric discharge, well cleaning, pressure wave, amplitude, electric discharge equipment