

Повышение электромагнитной помехоустойчивости скважинного разрядно-импульсного оборудования

К. В. Дубовенко^a, Ю. И. Курашко^b

^aНиколаевский государственный аграрный университет,
ул. Парижской Коммуны, 9, г. Николаев, 54010, Украина, dubovenko2010@gmail.com

^bИнститут импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54016, Украина

С целью обеспечения электромагнитной помехоустойчивости разрядно-импульсного оборудования для повышения дебита нефтяных и артезианских скважин выполнено количественное определение уровня электромагнитных помех, генерируемых высоковольтными разрядами, места их возникновения и пути распространения. Проанализированы конструкция установки, ее расположение в скважине и пути растекания тока вдоль ее корпуса через среду, заполняющую скважину. Определено влияние двух составляющих полного тока – тока проводимости и тока смещения на значения и распределение характеристик электрического поля в исследуемой системе объектов, к которой непосредственно относятся разрядно-импульсная установка, заполняющая скважину жидкостью, и обсадная труба скважины. На основании выполненного анализа разработана схема замещения рассматриваемой системы, определены параметры ее элементов с учетом скинирования тока в корпусе установки, разработана математическая модель для определения уровня электромагнитных помех. Численным решением математической модели установлено неравномерное распределение амплитудных значений электрического потенциала по длине корпуса установки в каждый момент времени, высокие импульсные значения электрического потенциала в зоне расположения электронных средств управления разрядно-импульсным оборудованием, зависимость которого от времени воспроизводит форму кривой тока электрического разряда; существенное влияние удельной электропроводности жидкости в скважине на распределение электрического потенциала. Благодаря выполненному численному анализу удалось существенно повысить надежность эксплуатации разрядно-импульсного оборудования путем экранирования корпуса, который не был сплошным в области кабельного ввода, и отделением нулевой точки высоковольтного зарядного устройства с промежуточным преобразованием частоты от корпуса установки.

УДК 621.314

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение добычи нефти и воды путем повышения производительности нефтедобывающих и водозаборных скважин является важной народнохозяйственной задачей. В настоящее время эта задача решается возбуждением волновых возмущений в нефте- или водонасыщенном слое, благодаря чему осуществляется очистка нефте- или водоносных каналов, засоряющихся отложениями при эксплуатации скважин [1]. Волновые процессы в жидкости, заполняющей скважину, создаются погружными разрядно-импульсными установками, генерирующими мощные высоковольтные электрические разряды с заданной частотой следования импульсов на глубине залегания нефте- или водоносного пласта. При работе установки в ее разрядном контуре протекает ток разряда емкостного накопителя энергии с амплитудой в десятки килоампер и периодом колебаний до 10^{-5} с. Переменный ток такой величины и длительности генерирует в окружающем пространстве сильное импульсное электромагнитное поле, которое служит источником помех, отрицательно воздействующих на работу полупроводниковых устройств разрядно-

импульсного оборудования. В предыдущих разработках скважинных устройств [2, 3] система управления установкой была пространственно удалена от сильноточного погружного оборудования, находясь на поверхности (у устья скважины) и соединяясь с ним электрически геофизическим кабелем. В компактных импульсных системах нового поколения [4, 5] зарядное устройство емкостного накопителя энергии с преобразователем частоты резонансного типа, разрядный контур и система управления находятся в одном корпусе погружной части установки (рис. 1), соединенной с наземным оборудованием кабельной линией ($KЛ$) на основе геофизического кабеля. В состав высоковольтного зарядного устройства входят фильтр C_1 , мостовой инвертор $VT_1...VT_4$, собранный на транзисторах типа IGBT, индуктивно-емкостный преобразователь LC_2 , высоковольтный трансформатор TV , высоковольтный выпрямитель $VD_1...VD_4$, емкостный накопитель C_3 и система управления $СУ$. При этом необходимо учитывать воздействие на слаботочные цепи электромагнитных помех, снижающих надежность работы разрядно-импульсного оборудования.

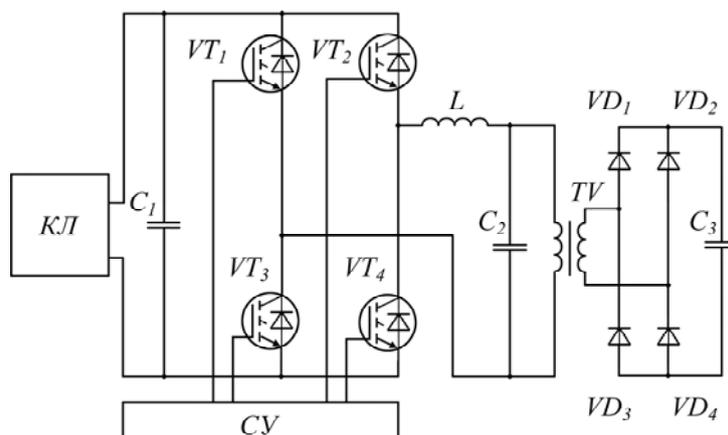


Рис. 1. Упрощенная электрическая схема зарядного устройства погружного блока скважинной разрядно-импульсной установки.

Цель работы – создание численной методики расчета для поиска причин возникновения и количественного анализа уровня электромагнитных помех в узлах разрядно-импульсного оборудования скважинных установок для обеспечения их электромагнитной совместимости.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рабочем состоянии разрядно-импульсная установка для восстановления производительности скважин находится в обсадной трубе 1 скважины в подвешенном состоянии на геофизическом (каротажном) кабеле 2 (рис. 2а). Установка представляет собой размещенный в стальном цилиндрическом корпусе 3 высоковольтный генератор импульсных токов, состоящий из зарядного устройства 4, накопителя энергии в виде высоковольтных импульсных конденсаторов 5, узла их подключения одним выводом на корпус 6, газонаполненного разрядника 7, электродной системы 8. В процессе зарядки емкостного накопителя напряжение на нем возрастает. Это приводит к пробое разрядника и формированию в межэлектродном промежутке электродной системы плазменного канала, в котором с большой скоростью выделяется энергия, запасенная в накопителе, и повышается давление.

Стальной корпус скважинной установки в зоне электродной системы не является сплошным. Поэтому периодические интенсивные гидродинамические возмущения, формируемые вокруг канала передаются по среде, заполняющей электродную систему, к перфорированной обсадной трубе и воздействуют на окружающую скважину породу. В результате из пор породы удаляются парафинообразные продукты коагуляции, и приток нефти или воды в скважину возрастает. Таким образом, устройство представляет собой цилиндрическую конструкцию, в которой разрядный контур образован последовательно соединенными емкостным накопителем, газона-

полненным разрядником и электродной системой. Часть стального корпуса 3 скважинной установки (между точкой подсоединения электродной системы 9 и линией окружности 6 подключения на корпус одного из выводов каждого конденсатора батареи) является обратным токопроводом (рис. 2а). Поскольку частота разрядного тока высока, протекание тока по стальному корпусу сопровождается эффектом скинирования, из-за чего его сопротивление корпуса существенно увеличивается. Вследствие этого потенциал корпуса скважинной установки в процессе разряда не остается постоянным, а изменяется во времени в соответствии с изменением величины разрядного тока. Кроме того, заполняющая скважину жидкость имеет конечную проводимость. Поэтому ток протекает не только по корпусу, но и через жидкость и металлическую обсадную трубу скважины. При этом сопротивление тонкого слоя воды между коаксиально расположенными корпусом скважинной установки и обсадной трубой может иметь небольшую величину из-за большой боковой поверхности как корпуса, так и трубы. Поэтому знание распределения изменяющегося в течение времени разряда электрического потенциала вдоль корпуса скважинной установки позволяет оценить уровень помех, возникающих при работе мощного источника электромагнитных возмущений – генератора импульсных токов.

Таким образом, основная задача исследования заключается в нахождении пространственно-временного распределения электрического потенциала в системе тел, образованной частью заполненной жидкостью стальной обсадной трубы, в которой расположена разрядно-импульсная установка.

Для математической формулировки задачи необходимо прежде всего знать, как формируется электрическое поле в рассматриваемом объеме. Из электродинамики сплошных сред извест-

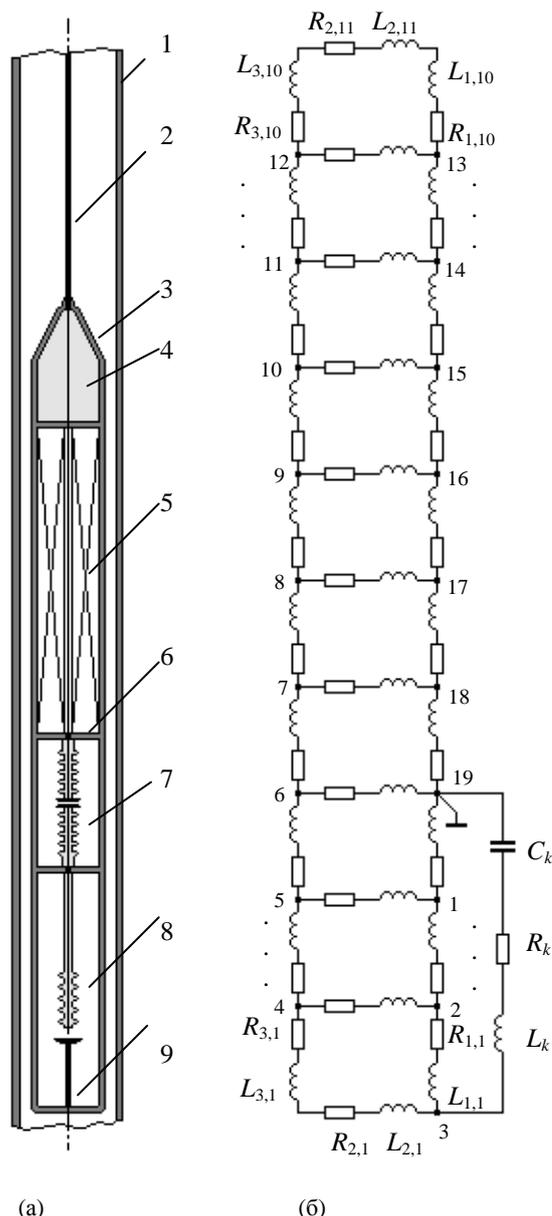


Рис. 2. Разрядно-импульсная установка (а) и схема ее замещения (б).

но [6], что в общем случае поле в среде формируется двумя составляющими полного тока: током смещения и током проводимости. Вклад той или иной составляющей полного тока в значение и характер распределения характеристик электрического поля в пространстве определяется соотношением длительности импульса напряжения t_u и времени релаксации среды:

$$\tau = \varepsilon \varepsilon_0 / \sigma, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость; σ – удельная электропроводность среды.

При значении τ , удовлетворяющем случаю $t_u \ll \tau$, поле формируется током смещения. В обратном случае, когда справедливо неравенство $t_u \gg \tau$, основной вклад в значения и распределение характеристик электрического поля вносит ток проводимости.

Для сред, заполняющих скважины, характерны значения удельной электропроводности σ в диапазоне от 10^{-3} до 1 См/м. Причем порядку величины 10^{-3} См/м соответствуют значения удельной электропроводности нефтеводяных смесей. Диапазону 10^{-2} См/м $\leq \sigma \leq 10^{-1}$ См/м соответствует удельная электропроводность водопроводной воды. А значения удельной электропроводности, имеющие порядок 1 См/м, характерны для морской воды. В рассматриваемом диапазоне изменения удельной электрической проводимости жидкости согласно (1) длительность времени релаксации находится в диапазоне значений, изменяющихся от $\tau = 7 \cdot 10^{-10}$ до $7 \cdot 10^{-8}$ с при продолжительности полупериода электрического разряда $t_u \approx 10^{-5}$ с.

Таким образом, неравенство $t_u \gg \tau$ выполняется с большим запасом, и можно считать, что поле в среде формируется током проводимости.

На основании изложенного электрическая схема замещения рассматриваемой системы (обсадная труба – жидкость – установка) имеет вид, представленный на рис. 2б. При построении схемы замещения вся область по длине установки разбивалась на участки, количество которых $n = 10$ определялось необходимой точностью расчета. Каждому участку соответствовала ветвь электрической цепи схемы замещения с соответствующими значениями активных сопротивлений и индуктивностей. На схеме с нумерацией снизу вверх обозначены сопротивления и индуктивности участков обсадной трубы $R_{1,1} \dots R_{1,10}$, $L_{1,1} \dots L_{1,10}$, водных промежутков $R_{2,1} \dots R_{2,11}$, $L_{2,1} \dots L_{2,11}$ и корпуса установки $R_{3,1} \dots R_{3,10}$, $L_{3,1} \dots L_{3,10}$. Параметры C_k , L_k , R_k представляют собой емкость конденсаторной батареи, индуктивность разрядного контура и нелинейное сопротивление плазменного канала в межэлектродном промежутке соответственно. На рис. 2б также представлена нумерация узлов схемы замещения.

Для численного моделирования распределения тока в ветвях схемы замещения в работе использована модификация формализованного метода расчета электрических цепей [5]. В соответствии с ним система уравнений, описывающая работу импульсного источника, составлена на основании первого закона Кирхгофа и разрешается относительно узловых потенциалов. Для получения решения используется узловый метод, согласно которому каждая ветвь схемы в общем случае включает последовательно соединенные источник ЭДС E_j , сопротивление R_j , индуктивность L_j (установленную или паразитную), емкость C_j . Причем каждая ветвь должна содержать хотя бы индуктивность. В соответствии с методом полагалось, что ток j -й ветви совпадает по направлению с ЭДС E_j , а узел, имеющий нулевой потенциал, обозначается последним по счету:

$$\sum_{j=1}^m \frac{dI_j}{dt} = 0, \quad \frac{dI_j}{dt} = \frac{1}{L_j} (\Delta\varphi_j + U_j), \quad (2)$$

$$U_j = E_j - R_j I_j - P_{cj} Q_{cj}, \quad \frac{dQ_{cj}}{dt} = I_j, \quad (3)$$

где m – количество ветвей схемы замещения; P_{cj} – коэффициент, учитывающий наличие емкости в ветви. Причем $P_{cj} = 1/C_j$, если есть емкость в ветви. При отсутствии емкости $P_{cj} = 0$; $\Delta\varphi_j$ – разность потенциалов между узлами j -й ветви схемы; Q_{cj} – электрический заряд емкости в ветви схемы.

Таким узлом в рассматриваемой схеме замещения является узел 19 ($\varphi_{19} = 0$), точка «земли» разрядного контура которой геометрически со-

ответствует линия окружности b подключения к корпусу одного из выводов каждого конденсатора емкостного накопителя (рис. 2а).

Сопротивления и индуктивности схемы замещения определялись по предварительно рассчитанным погонным значениям с учетом геометрии и размеров конструкции, удельной электропроводности материалов и сред, из которых она состоит. В расчетах погонных сопротивлений корпуса и обсадной трубы принималось во внимание скинирование тока [7]. В этом случае погонное сопротивление стального цилиндрического проводника составляет [7, стр. 32]:

$$R_1 = \frac{k}{\pi\sigma D} = \frac{\sqrt{\omega\mu_0\mu\sigma_{ст}}}{\sqrt{2\pi D\sigma_{ст}}} = \frac{2}{D} \sqrt{\frac{f\mu}{10\sigma}} \cdot 10^{-3} = 7,44 \sqrt{\frac{f}{10}} \cdot \frac{10^{-3}}{D} \text{ (Ом/м)}, \quad (4)$$

где k – модуль коэффициента вихревых токов; ω – циклическая частота тока в разрядном контуре; $\sigma_{ст}$ – удельная электропроводность стали, μ_0 – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость стали; f – частота колебаний тока; D – диаметр проводника.

В расчетах внешний диаметр стального корпуса установки задавался равным 102 мм, а внутренний радиус стальной обсадной трубы – 152 мм.

Сопротивление жидкости, заполняющей зазор между корпусом установки и обсадной трубой, определялось на основании математической аналогии электрического и электростатического полей с использованием соотношения, представленного в [8], для пересчета проводимости системы по значению ее емкости при заданных геометрических параметрах системы:

$$R = (G)^{-1} = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} C \right)^{-1}, \quad (5)$$

где G – электрическая проводимость между рассматриваемыми телами в среде с удельной электрической проводимостью σ ; C – емкость рассматриваемой системы.

В свою очередь емкость системы корпус установки–обсадная труба рассчитывалась по соотношению для емкости системы, состоящей из прямого круглого цилиндра конечной длины внутри бесконечно длинного цилиндра, полученному в [8]:

$$C = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 b r_k}{1 - 0,87 b r_k / r_t}, \quad b = 0,637 + 0,554 \left(\frac{h_i}{2r_k} \right)^{0,76}, \quad (6)$$

где r_i – внутренний радиус обсадной трубы; r_k – внешний радиус корпуса установки; h_i – длина установки.

По значениям погонных сопротивлений корпуса и обсадной трубы из (4) определялись сопротивления их участков, соответствующих схеме замещения рис. 2б.

Оценка индуктивностей в ветвях схемы замещения при заданной геометрической конфигурации системы выполнялась с использованием соотношения [8]:

$$L_h \approx \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu / C_h, \quad (7)$$

где L_h – погонная индуктивность системы; $C_h = C/h_i$ – погонная емкость той же системы.

Расчет нелинейного сопротивления плазменного канала R_k в межэлектродном промежутке электродной системы (рис. 2б) выполнялся с применением математической модели электрического разряда в жидкости, разработанной в [9]. В этой же работе представлено сравнение расчетных и совокупности экспериментальных данных, свидетельствующее о достоверности получаемых результатов численного моделирования.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

На рис. 3 представлены результаты расчета временной зависимости тока в разрядном контуре и напряжения на межэлектродном промежутке. Параметры разрядного контура установки в расчетах соответствовали реальным параметрам установки [10] и составляли: емкость конденсаторной батареи емкостного накопителя энергии $C_k = 6 \cdot 10^{-6}$ Ф, ее начальное напряжение $U_k = 2 \cdot 10^4$ В, индуктивность разрядного контура $L_k = 1,1 \cdot 10^{-6}$ Гн, длина межэлектродного промежутка $l = 4 \cdot 10^{-2}$ м. Полученные зависимости хорошо согласуются с результатами экспериментальных данных работы [10]. При заданных параметрах контура амплитуда тока разряда достигает значения $2,7 \cdot 10^4$ А, а период разряда равен $1,8 \cdot 10^{-5}$ с.

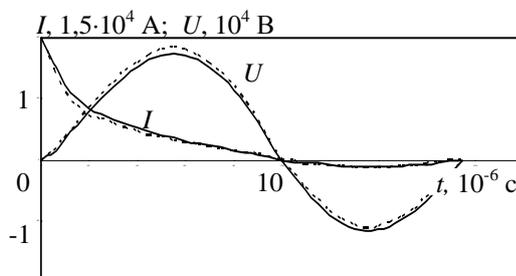


Рис. 3. Временная зависимость тока разряда и напряжения на межэлектродном промежутке (пунктир – расчет [9]; сплошные линии – эксперимент [10]).

Результаты расчета распределения электрического потенциала вдоль корпуса установки и об-

садной трубы в момент максимума тока разряда представлены на рис. 4 для различных значений удельной электропроводности жидкости, заполняющей скважину. Здесь начальная точка отсчета длины корпуса установки соответствует нижней точке разрядной камеры 9 на рис. 2а. Полученные данные свидетельствуют о том, что при электрическом разряде распределение электрического потенциала вдоль длины установки неравномерно. На определенном расстоянии от точки нулевого потенциала корпуса ($\varphi_{19} = 0$) образуется область повышенного потенциала.

В момент максимума тока конденсаторная батарея C_k разряжена, индуктивная составляющая падения напряжения LdI/dt равна нулю, практически все падение напряжения приложено к рабочему межэлектродному промежутку. Поэтому потенциал электрода, гальванически связанного с корпусом разрядной камеры, наиболее высок и достигает значения $6,5 \cdot 10^3$ В для $h = 0$ в точке 9 на рис. 2а (кривая 1 на рис. 4а). Из-за падения напряжения в заполненной жидкостью скважине зазоре между корпусом и обсадной трубой потенциал обсадной трубы, соответствующий координате $h = 0$, уменьшается до значения $4 \cdot 10^3$ В, а потом постепенно снижается вдоль ее длины (кривая 2 на рис. 4а). Следует отметить, что в момент максимума тока зависимость распределения электрического потенциала от длины корпуса установки сначала быстро уменьшается от 6500 В до нуля при увеличении h от нуля до «общей» (нулевой) точки корпуса с координатой $h = 0,75$ м, а затем наклонно возрастает до 700 В на остальной длине корпуса (кривая 1 на рис. 4а). Последнее связано с перезамыканием линий плотности тока с обсадной трубы через жидкость скважины на корпус установки. Чем выше электропроводность воды, тем на более коротком расстоянии от нулевой точки происходит замыкание линий плотности тока. Поэтому тем меньше разница в значениях электрического потенциала точек обсадной трубы и корпуса установки с одинаковыми пространственными координатами и тем ниже уровень потенциала на длине корпуса установки со стороны питающего ее каротажного кабеля (рис. 4б–г).

Таким образом, при значении удельной электрической проводимости жидкости $\sigma = 10^{-2}$ См/м, характерном для водонефтяных эмульсий, ее сопротивление протеканию тока оказывается достаточно большим. Вследствие этого ток «утечки» сосредоточен в основном в ближней окрестности точки с $\varphi = 0$. В этом случае электрические потенциалы обсадной трубы и корпуса в процессе разряда не успевают выровняться. Причем потенциал корпуса вблизи подсоединения каротажного кабеля в районе зарядного

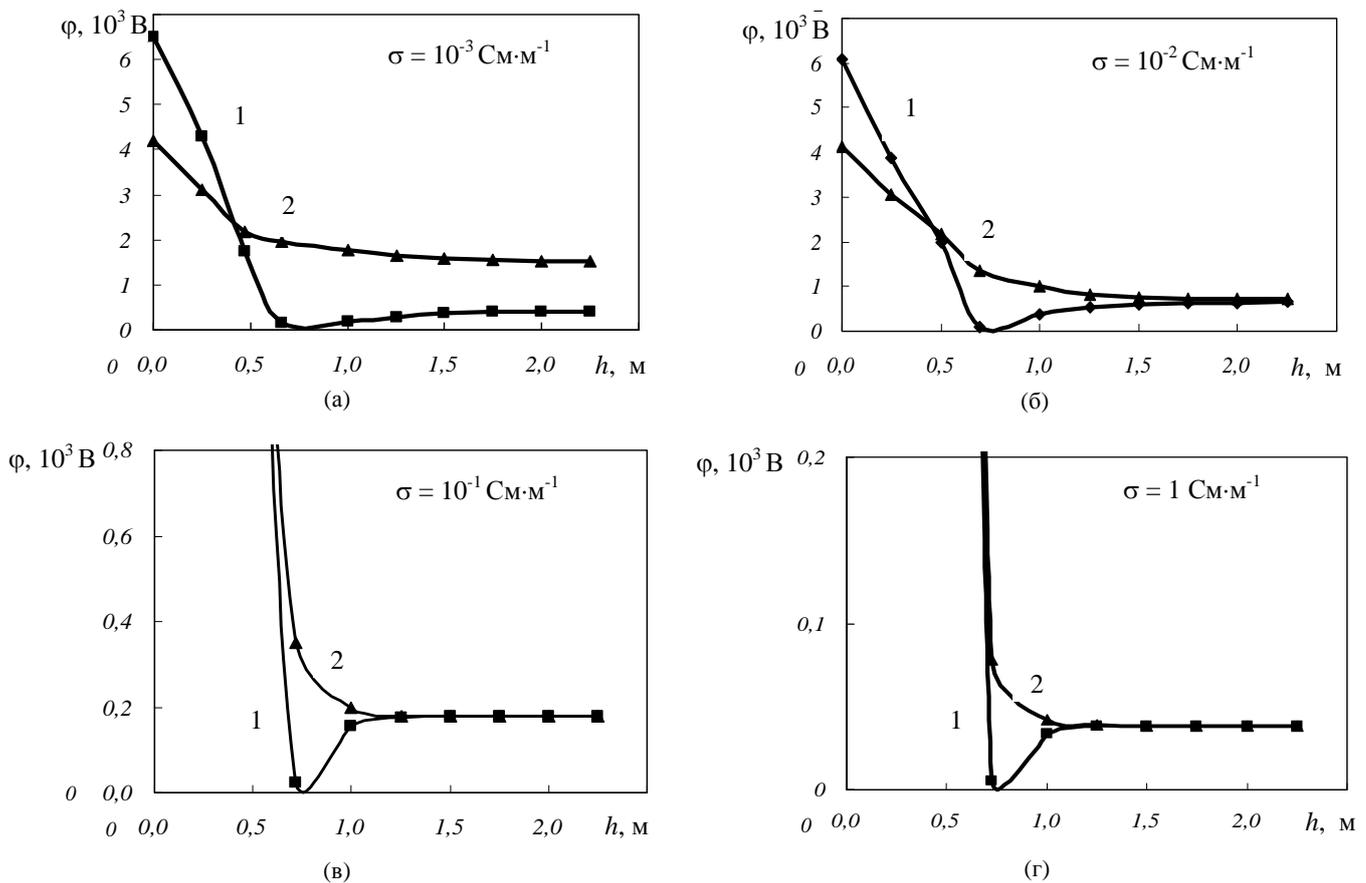


Рис. 4. Распределение электрического потенциала в момент максимума разрядного тока для различных значений удельной электропроводности жидкости в скважине по длине h корпуса установки (1) и обсадной трубы (2).

устройства 4 (рис. 2а) достигает значения 700 В. С учетом колебательного режима разряда диапазон изменения потенциала в этой области в течение периода переходного процесса пропорционален изменению тока между двумя последовательными амплитудными значениями и достигает 1300 В при частоте разряда $f = 1/T \approx 5 \cdot 10^4$ Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ позволил выяснить причину электромагнитной несовместимости узлов электрооборудования погружной разрядно-импульсной установки на ранней стадии ее создания. С учетом того, что конструкция кабельного ввода скважинной установки в зоне расположения зарядного устройства не имела сплошного экрана, высокочастотный сигнал с большой амплитудой являлся сильной электромагнитной помехой, проникавшей индукционным способом в область зарядного устройства и приводившей к сбоям в его работе. Кроме того, «плавающий» в широком диапазоне потенциал корпуса установки привел к необходимости надежной изоляции «цифровой земли» системы управления резонансным инвертором от заземления силовой части установки. Выполнение указанных мероприятий практически устранило сбои, связанные с

электромагнитной несовместимостью узлов погружного электрооборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сизоненко О.Н., Швец И.С., Кучернюк А.В. Применение электроразрядного воздействия для обработки добывающих и нагнетательных скважин. *Нефтяное хозяйство*. 2000, (12), 133–135.
2. 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 «Харьковский политехнический институт»*. 2002, 7, 96–103.
3. Dubovenko K., Kurashko Yu., Onyshchenko L., Shvets I.S. et al. Equipment Developed at IPRE for Well Stimulation in the Process of Oil and Water Production. *Pulsed Power Plasma Science 2001 IEEE Int. Conf. Las Vegas, Nevada*, 2001, 1070–1073.
4. Хвощан О.В., Курашко Ю.И., Литвинов В.В. Анализ схем зарядной цепи малогабаритных погружных скважинных устройств повышенной мощности // *Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. 2008, 21, 134–143.
5. Щерба А.А., Дубовенко К.В. *Высоковольтные электроразрядные компактные системы*. Киев: Наукова думка, 2008. 270 с.

6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред*. М.: Физматлит, 2003. 656 с.
7. Белоруссов Н.И., Гроднев И.И. *Радиочастотные кабели*. М.: Энергия, 1983. 176 с.
8. Иоссель Ю.Я., Качанов Э.С., Струнский М.Г. *Расчет электрической емкости*. Л.: Энергоиздат, 1981. 288 с.
9. Дубовенко К.В. Численное моделирование пространственно-временных характеристик подводного электрического разряда. *Электротехника и электромеханика*. 2010, (1), 36–42.
10. Швец И.С. К определению удельной электропроводности плазмы подводного электрического разряда. *Теплофизика высоких температур*. 1980, **18**(1), 1–9.

Поступила 17.03.12

Summary

In order to ensure electromagnetic noise immunity of pulse power equipment intended for increasing oil and artesian well output production the quantitative determination of the level of electromagnetic interference generated by high voltage discharges, places of their origin and ways of distribution has been carried out in the article. The design of the installation, its location in the borehole and the ways of current spreading along the installation hull through the medium that fills the borehole have

been analyzed. The effect of both components of the total current, i.e. of the conduction current and the displacement current, on the values and characteristics of the electric field distribution in the studied system of objects, including the pulsed power installation, the liquid medium filling the borehole and the well casing has been determined. On the basis of the analysis performed the equivalent circuit of the system has been worked out, the parameters of its elements have been determined with accounting for the skin effect in the installation hull, the mathematical set of equations has been worked out to determine the level of electromagnetic interference. The uneven distribution of the electric potential amplitude values along the installation hull length at every moment, high pulse values of the electric potential within the location of electronic means controlling the pulse power equipment, whose dependence on time reproduces the shape of the electric discharge current, a significant effect of the specific conductivity of the liquid in the well on the distribution of electrical potential have been obtained with numerical solution of the mathematical model. On the base of the performed numerical analysis the reliability of the pulse power equipment operation has been significantly improved by shielding the hull, which was not continuous in the area of the cable entry, and separation of zero point of the high-voltage charging device with an intermediate frequency conversion from the installation hull.