

О.Ю. Гончаров, В.И. Курец, В.В. Лопатин, В.М. Муратов

### **ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ИМПУЛЬСА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ФИЛЬТРОВ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОДОЗАБОРОВ**

*ФГНУ НИИ высоких напряжений,  
пр. Ленина, 2<sup>а</sup>, 634050, г. Томск, Россия*

#### **Введение**

Фильтрация – одна из обязательных операций в технологии подготовки воды для питья. Воды подземных водозаборов в Западно-Сибирском регионе характеризуются большим содержанием железа, марганца, кальция, гуминовых соединений, органоминеральных комплексов и других примесей. Они тяжело фильтруются, плохо отстаиваются, а при эксплуатации фильтров изменяется состав фильтрующей загрузки, кольматируются отверстия дренажных труб, что требует принятия специальных мер для поддержания фильтров в рабочем состоянии. В настоящее время эта задача решается регламентными операциями обратной промывки фильтров, реагентной обработкой воды и др., которые не всегда достигают поставленной цели или достаточно дороги. Поэтому через определенный отрезок времени производят полную замену фильтрующей загрузки и дренажных труб, что также требует значительных финансовых затрат. Одним из перспективных методов восстановления фильтров, увеличивающих сроки их эксплуатации между капитальными ремонтами, является электроразрядный способ обработки фильтрующей загрузки и дренажных труб, при котором «рабочим инструментом», воздействующим на объект, служит электрическая искра [1].

В настоящее время известны работы по очистке внутренних поверхностей труб от отложений [2], декольматации отверстий в фильтрах водозаборных и нефтяных скважин [3, 4], уплотнению водонасыщенных песчаных грунтов в геостроительстве [5] и др., в которых в качестве инструмента воздействия рассматривается электрическая искра. Они базируются на фундаментальных исследованиях электрического разряда в жидких средах и сопровождающих его явлениях [6–10]. Однако в каждом конкретном случае использование этой технологии требует выявления основных действующих факторов и соответственно определения оптимальных параметров генератора импульсов, связанных с физико-механическими и электрофизическими свойствами обрабатываемых сред и объектов.

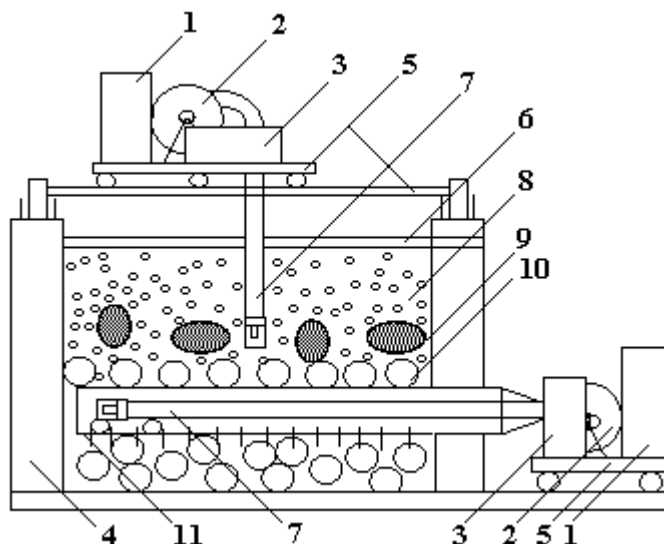
В данной работе на базе анализа действующих факторов, сопровождающих электрический разряд в воде и в водных суспензиях, оценим параметры генераторов импульсов, работающих в условиях повышенной электропроводности среды, для решения задачи восстановления фильтров подземных водозаборов.

#### **Объекты обработки**

Для решения указанной задачи требуются объекты, которые необходимо разрушать, знание их свойств и условий осуществления процесса.

Принципиальная схема фильтра и расположение оборудования для восстановления параметров фильтрующей загрузки и очистки дренажных труб представлены на рис. 1. В качестве примера приведем параметры скоростных фильтров обезжелезивания Томского подземного водозабора. Станция обезжелезивания включает два блока скоростных фильтров (по 12 фильтров в каждом блоке) размером 6,20x9,20x4,25 м<sup>3</sup>. Загрузка состоит из отсева дробленых горных пород (альбитофиры, гранодиорит, горелые породы) крупностью 2–5 мм, высота слоя – от 1,4 до 1,65 м. Объем загружаемого материала ~ 72,96 м<sup>3</sup>. В качестве поддерживающих используют три слоя: 1-й – гравий крупностью ≥ 20 мм, высотой 0,2 м, 2-й – щебень крупностью ~ 10–20 мм, высотой 0,1 м, 3-й – щебень круп-

крупностью ~ 5–10 мм, высотой 0,1 м. Основу дренажной системы составляют полиэтиленовые и стальные трубы диаметром до 140 мм с отверстиями, расположенными внизу трубы в шахматном порядке (диаметр отверстий – 12 мм, шаг между ними – 150 мм). Как видно из рисунка, представленные устройства для восстановления работоспособности фильтров однотипны и включают генератор импульсов, систему транспортировки импульса к рабочему промежутку, снаряд-излучатель с рабочим промежутком, систему транспортирования или сканирования снаряда-излучателя в обрабатываемом объеме.



*Принципиальная схема фильтра и расположение оборудования для восстановления фильтрующей загрузки и очистки дренажных труб. 1 – генератор импульсов с зарядным устройством; 2 – барабан для укладки кабеля; 3 – привод; 4 – корпус фильтра; 5 – тележки для перемещения снаряда-излучателя; 6 – труба сброса промывных вод; 7 – снаряд-излучатель; 8 – фильтрующая загрузка; 9 – оолиты; 10 – поддерживающий слой; 11 – дренажная труба*

Анализ осадков из фильтрующей загрузки Томского водозабора [11] показал, что в нем присутствуют слабокристаллические образования с характерным слоистым строением (оолиты), состоящие из верхней корочки рыхлого слоя и плотного ядра. Размеры оолитов достигают диаметра ~ 5–20 см. В минеральном составе оолитов преобладают гидроксиды железа (ферригидрит, гетит, гематит, лепидокрокит) ~25–35%, железистые гидрофосфаты (вивианит, штрэнгит, штрунцит, рокбриджит) ~20–30%, глинистые минералы группы коалинита ~ 10–12%, карбонаты ~ 10–15%, а также железистые органокомплексы ~ 5%. Прочность на сжатие этих образований  $\sigma_m \sim (0,5-1)10^7$  Па. Они не разрушаются при промывке и в процессе эксплуатации за счет гидроклассификации опускаются в нижнюю часть фильтра (образуя застойные зоны) и снижают его производительность.

Анализ осадков с поверхностей дренажных труб и прилегающих к ним частиц поддерживающего слоя фильтра показал, что консистенция отложений достаточно рыхлая и пластичная, включающая гидроокись железа (в том числе бактериального происхождения) и другие составляющие, указанные выше. Толщина слоя этих отложений достигает 1–5 мм. Отложения кольматируют отверстия дренажных труб и поверхность частиц поддерживающего слоя, снижая производительность фильтров. Обратная водо-воздушная промывка дренажной системы не позволяет удалить полностью эти отложения.

Таким образом, восстановление работоспособности фильтров включает две задачи: декольматацию отверстий дренажных труб с очисткой их поверхностей и очистку поверхности частиц поддерживающего слоя; разрушение твердых образований в застойных зонах фильтров. Следует отметить, что в каждой из задач свойства обрабатываемых объектов существенно отличаются, поэтому необходимо использовать в каждом случае такие явления, сопровождающие электрический импульсный разряд, которые обеспечат их эффективное решение. При выборе параметров источника импульсов, конструкции рабочего снаряда-излучателя и других характеристик всего устройства следует учитывать высокую удельную электропроводность ( $\sigma \sim 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ) промывных вод, в которых

осуществляется процесс, а также габариты и массу всей установки – она должна быть транспортабельна, так как комплекс должен перемещаться от одного фильтра к другому.

Известно [6, 8], что локальный канал разряда в жидкости генерирует ударные волны, волны сжатия, кавитационные поля за фронтом ударной волны и скоростные потоки жидкости при расширении и схлопывании парогазовой полости (ППП), в которую вырождается плазма канала разряда при завершении всех электрических процессов в разрядном контуре. Поскольку все процессы в той или иной степени создают необходимые воздействия на объекты, требующие разрушения, то реализация электроразрядной технологии для восстановления работоспособности фильтров возможна только при формировании локального канала разряда в рабочем промежутке снаряда-излучателя.

### Параметры генератора импульсов для восстановления фильтрующей загрузки

Оценим по порядку величин параметры источника импульсов для восстановления свойств фильтрующей загрузки при условии, что в рабочем промежутке сформирован локальный канал разряда и дезинтеграция застойных зон фильтров происходит за счет ударных волн и волн сжатия.

Давление на фронте ударной волны как функция расстояния и времени [12] может быть рассчитана по выражению

$$D_0 \approx 0,06 D_m \left( \frac{l_{\text{пр}}}{R_i} \right)^2 \exp \left( -\frac{t}{\theta} \right) \sigma [T - t], \quad (1)$$

где  $P_m$  – максимальное давление в канале разряда за первый полупериод колебания разрядного тока, Па;  $l_{\text{пр}}$ ,  $R_i$  – длина рабочего промежутка и текущий радиус от канала разряда в направлении движения ударной волны, см;  $t \approx R_i / a_0$  – текущее время подхода ударной волны к конкретной точке, с;  $a_0$  – скорость звука в исследуемой среде, м/с (для воды  $a_0 \sim 1500$  м/с);  $\theta$  – характерное время [8], с;

$\sigma [T - t]$  – разрывная функция  $\sigma [T - t] = \begin{cases} 0; T \leq t \\ 1; T \geq t \end{cases}$ ,  $T$  – расчетное время подхода волны к конкретной

точке.

Давление в канале разряда  $P_m$  можно также определить из следующего эмпирического выражения [8]:

$$P_m \approx 0,26 \sqrt{\frac{\rho_a U_0^2}{L l_{\text{пр}}}}, \quad (2)$$

где  $U_0$  – амплитуда импульса,  $\rho_a$  – плотность воды,  $L$  – индуктивность контура,  $l_{\text{пр}}$  – длина рабочего промежутка.

Для рассматриваемых условий, принимая  $\rho_a \approx 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $l_{\text{пр}} = (1-3) \cdot 10^{-2}$  м, КПД передачи энергии из источника импульсов в канал разряда  $\eta \approx 0,5$ ,  $L \sim 15$  мкГн, напряжение  $U \sim 30-50$  кВ, величина давления в канале разряда  $P_m \approx (4-7) \cdot 10^8$  Па.

Используя выражения (1) и (2), можно определить ориентировочную зону разрушения оолитов в застойных зонах фильтра от действия единичного разряда при условии отсутствия потерь энергии импульса в предпробивной стадии развития разряда и  $P_{\text{ф}} \sim \sigma_m$ , где  $\sigma_m$  – прочность оолитов на сжатие. При указанных выше параметрах диаметр активного действия единичного разряда составит  $D \sim 6-10$  см, то есть шаг сканирования снаряда-излучателя в застойных зонах должен составлять  $\sim 20$  см.

Выбор амплитуды импульса является оптимизационной задачей. С одной стороны, увеличение амплитуды импульса при постоянной индуктивности разрядного контура увеличивает давление в канале разряда и соответственно увеличивает активную зону его действия, с другой – растут массогабаритные характеристики установки. Поэтому целесообразно использовать минимальную амплитуду импульса, при которой возможно формировать локальный канал разряда в рабочем промежутке снаряда-излучателя. Минимальная средняя напряженность  $E_{\text{ср}}$  в рабочем промежутке, обеспечивающая формирование локального канала разряда, для системы электродов «острие–плоскость» в воде известна [8] и составляет  $\sim 4 \cdot 10^6$  В/м. Эта величина зависит от соотношения амплитуды импульса и длины рабочего промежутка. Учитывая статистический характер электрической прочности водных суспензий, следует использовать  $U \sim (30-50)$  кВ,  $l_{\text{пр}} \sim (10-20)$  мм.

Выбор энергии импульса ( $W = CU^2/2$ , где  $C$  – разрядная емкость генератора,  $U$  – амплитуда импульса напряжения) определяется способностью источника поддерживать заданный уровень амплитуды напряжения на рабочем промежутке от подачи импульса до окончательного формирования канала разряда (время запаздывания), который составляет  $t_3 \sim 10-100$  мкс, и обеспечивать необходи-

мую температуру канала разряда в течение первого колебания разрядного тока. В общем виде энергию импульса можно оценить по выражению

$$W \sim \eta W_k + W_n, \quad (3)$$

где  $W_k$  – энергия, выделившаяся в канале разряда,  $\eta$  – КПД передачи энергии из источника импульсов в канал разряда,  $W_n$  – потери энергии в предпробивной стадии развития канала разряда.

Энергия  $W_k = A + E_1 + E_2$ , где  $A$  – работа, совершаемая каналом разряда в окружающей среде;  $E_1$  – внутренняя энергия плазмы канала разряда, выделившейся за первый полупериод колебаний разрядного тока;  $E_2$  – энергия, выделившаяся за остальные периоды колебания разрядного тока. Величина  $W_k$  при диаметре канала разряда в воде  $\sim 2 \cdot 10^{-2}$  см и длине  $\sim (1-2)$  см, по данным [9], составляет  $\sim (60-120)$  Дж. При  $\eta \sim 0,5$  первую составляющую уравнения (3) можно оценить как  $(120-240)$  Дж.

Расход энергии в предпробивной стадии развития разряда можно оценить по выражению  $W_n = W_1 + W_2 + W_3$ , где  $W_1$  – энергия, обеспечивающая создание перегретой неустойчивости вблизи потенциального электрода,  $W_2$  – энергия, связанная с растеканием тока с оголенных поверхностей потенциального электрода и с поверхности стримерных образований;  $W_3$  – энергия, необходимая для формирования стримеров в рабочем промежутке. Величина энергии  $W_n$  достаточно хорошо изучена [12]. Она зависит от конструкции снаряда-излучателя, удельной электропроводности воды, электрической схемы разрядного контура и его параметров, длины рабочего промежутка и других и может достигать значительных величин, при которых не образуется локальный канал разряда. Для условий, существующих при восстановлении фильтров и коаксиальной системы электродов, эта величина составляет  $\sim (300-400)$  Дж.

Таким образом, без специальных мероприятий по инициированию разряда энергия единичного импульса в рассматриваемой технологии должна быть в пределах  $\sim (500-700)$  Дж, то есть разрядная емкость  $C_p$  генератора импульсов при  $U \sim 50$  кВ должна быть в пределах  $\sim (0,4-0,6)$  мкФ.

Следует отметить, что инициирование разряда путем прокачки воды через рабочий промежуток и применение схем разрядного контура с использованием разрядного промежутка в зарядной цепи позволяют снизить энергию импульса, ориентируясь на минимальные значения, указанные выше. Кроме того, возможно использование нескольких разрядов в одной точке, что увеличивает вероятность разрушения твердых образований в застойных зонах фильтра.

#### **Параметры генератора импульсов для очистки дренажных труб**

Отложения на дренажных трубах и поддерживающем слое фильтров подземных водозаборов существенно отличаются от твердых образований в фильтрующей загрузке и представляют достаточно пластичные образования (в основном гидроокись железа) толщиной до 5 мм. При интенсивности регламентной обратной водо-воздушной промывки  $\sim 16$  л/с·м<sup>2</sup> и ее продолжительности в течение 10–20 мин полное удаление кольматирующего слоя затруднительно. Для решения этой задачи необходимо увеличивать интенсивность и продолжительность промывки, что связано с большим расходом воды и возможным выносом фильтрующего материала.

От отложений такого типа в дренажных трубах и поддерживающей загрузке нельзя избавиться за счет ударных волн и волн сжатия в связи с существенной диссипацией их энергий в пластических средах. Одним из факторов, сопровождающих электрический разряд в жидкости, являются высокоскоростные турбулентные потоки жидкости, возникающие при пульсации ППП, в которую рождается канал разряда после завершения всех электрических процессов. Для оценки скоростей движения жидкости воспользуемся математическим аппаратом, изложенным в [6]. Процесс расширения парогазовой полости без учета сжимаемости жидкости описывается уравнением

$$R \cdot R'' + 3(R')^2 / 2 = [P_1 (R_1/R)^{3\gamma} - P_0] / \rho_0, \quad (4)$$

где  $R = f(t)$  – текущий радиус ППП,  $\rho_0$  – плотность жидкости,  $P_1$  – давление ППП,  $P_0$  – атмосферное давление,  $\gamma$  – показатель адиабаты,  $R_1$  – начальный радиус канала разряда. Из условия непрерывности движения максимальная скорость жидкости будет соответствовать максимальной скорости роста ППП. Учитывая, что в начале роста ППП  $P_1 \gg P_0$ ,  $R' \rightarrow \max$ ,  $R'' \rightarrow 0$  и процесс носит адиабатический характер ( $\gamma = 4/3$ ), выражение (4) может быть преобразовано:

$$V_{\max} \approx 0,44(P_1 / \rho_0)^{1/2} \text{ и } R_{V_{\max}} \approx 1,33R_1. \quad (5)$$

Из выражений (5) видно, что максимальные скорости движения жидкости зависят от остаточного давления в канале разряда и от плотности жидкости, при этом радиус канала разряда увеличится всего на  $\sim 33\%$ . Остаточное давление в канале разряда при пробое как воды, так и суспензий можно по порядку величин принять [6]  $P_1 \sim 10^7$  Па, а радиус  $R_1 \sim 0,5 \cdot 10^{-3}$  м, тогда для воды  $V_{\max} \sim 40$  м/с при  $R_{V_{\max}} \sim 0,7 \cdot 10^{-3}$  м. Далее, по мере роста ППП, давление  $P_1$  и соответственно скорость движения границы "ППП–жидкость" будут уменьшаться. Однако в течение этого процесса жидкость,

находящаяся между ППП и стенкой камеры, будет выдавливаться вверх, приобретая определенную скорость. Средние значения этой скорости можно определить из условия изменения во времени радиуса ППП, прохождения объема жидкости через единицу поверхности за единицу времени. Тогда выражение для средней скорости движения жидкости между ППП и стенкой рабочей камеры можно записать в виде

$$V_{cp} = 2R^3(t) / 3t[L^2 - R^2(t)], \quad (6)$$

где  $t = t_{max} - t_0$ ,  $t_{max}$  – время достижения максимального размера ППП,  $t_0$  – время начала развития ППП. Приблизительно изменение радиуса ППП можно записать  $R(t) = R_{max} \sin \omega t$ , где  $t_0 \leq t \leq t_{max}$ ,  $\omega = \pi / t_{max}$ .

Максимальный радиус ППП с учетом близости поверхности можно рассчитать из выражения [6]:

$$R_{max} \approx k(3\eta_1 W_0 / 4\pi P_0)^{1/3} \approx 0,6k(\eta_1 W_0 / P_0)^{1/3} \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий близость твердой поверхности ( $k = 0,5$ );  $\eta_1$  – коэффициент, учитывающий долю энергии единичного импульса  $W_0$ , затрачиваемой на образование и движение ППП ( $\eta_1 \approx 0,4-0,7$ );  $P_0$  – внешнее давление (атмосферное и столба жидкости).

Оценить период пульсации можно по выражению Релея [6]:  $t_{max} = 1,83R_{max}(\rho_e / P_0)^{1/2}$ , где  $\rho_e$  – плотность жидкости, или после подстановки  $R_{max}$ :

$$t_{max} = k(\eta W_0)^{1/3} \rho_e^{1/2} / P_0^{5/6}. \quad (8)$$

Таким образом, в течение первой пульсации ППП средние скорости движения жидкости между стенкой дренажной трубы и ППП могут достигать 3–4 м/с.

Для подтверждения правомерности расчетных выражений проведены экспериментальные оценки максимального радиуса ППП и времени его достижения по скоростным кинограммам при энергии импульса  $W_0 = 200$  Дж. По данным кинограммы, максимальный радиус ППП составляет  $3,2 \cdot 10^{-2}$  м, а  $t_{max} = 4,5 \cdot 10^{-3}$  с, что достаточно хорошо совпадает с расчетными величинами.

Таким образом, в начале расширения ППП, когда ее радиус достигает ~ 30% от диаметра канала разряда, жидкость, окружающая ППП, ускоряется, достигая максимальной скорости ~ 40 м/с, а затем спадает. При дальнейшем росте ППП до максимальных размеров жидкость между стенкой дренажной трубы и ППП выдавливается, двигаясь со средней скоростью ~ 3–4 м/с. При схлопывании ППП процесс повторяется с обратным направлением движения жидкости. Каждый разряд может обеспечивать 2–3 пульсации, интенсивно очищая поверхность дренажных труб и поддерживающего слоя фильтра от отложений.

Известно [10], что энергию импульса, затрачиваемую на работу в окружающей среде (ударные волны, волны сжатия, динамика ППП), можно в определенных пределах перераспределять за счет изменения длины рабочего промежутка и амплитуды напряжения. При уменьшении длины рабочего промежутка уменьшается доля энергии импульса, выделившейся за первый полупериод колебаний разрядного тока, которая обеспечивает формирование ударных волн, и большая часть энергии импульса тратится на формирование ППП и соответственно на образование высокоскоростных потоков. Исходя из этих положений для очистки дренажных труб целесообразно использовать рабочие промежутки длиной 0,5–1 см, соответственно минимальный уровень амплитуды импульса, обеспечивающий стабильный пробой промежутка, можно снизить до ~ 30 кВ при условии инициирования разряда. Общая энергия импульса так же, как и для очистки фильтрующей загрузки, определяется предпробивными потерями энергии, потерями на формирование плазменного шнура и работой против окружающей среды. Следует отметить, что величина средней скорости жидкости зависит от соотношения диаметра дренажной трубы и максимального диаметра ППП, который зависит от энергии импульса (7), как  $W^{1/3}$ . Поэтому для очистки дренажных труб диаметром 80–200 мм величину  $W$  можно принять постоянной. По нашим оценкам, с учетом всех видов потерь минимальная энергия, запасаемая в генераторе импульсов, должна находиться в пределах 200–300 Дж, тогда разрядная емкость  $C_p$  генератора составит ~ 0,4–0,7 мкФ.

### Заключение

Таким образом, для восстановления пропускной способности фильтров обезжелезивания подземных водозаборов можно использовать однотипные генераторы импульсов с регулируемой амплитудой напряжения  $U = (30-50)$  кВ и разрядной емкостью  $C_p = (0,4-0,7)$  мкФ. Длина рабо-

чего промежутка в снаряде-излучателе для восстановления фильтровой загрузки должна составлять 1,5–2,0 см, а для очистки дренажных труб – 0,5–1 см. Технологически целесообразно использовать для обработки фильтрующей загрузки и очистки дренажных труб две комплектные установки, так как их расположение должно соответствовать территориальному расположению обрабатываемого объекта, а методы их транспортировки в процессе работы различны.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андрейченко А.А., Черкашин В.И., Гончаров О.Ю. и др. Электроразрядные технологии в системах водоснабжения хозяйственно-питьевого назначения // Труды научно-практической конференции «Основные водохозяйственные проблемы и пути их решения». Томск, 2005.
2. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев, 1990.
3. Курашко Ю.И., Мельхор Ю.И., Хвоцан О.В. и др. Электроимпульсные установки, предназначенные для повышения дебита артезианских скважин // Электронная обработка материалов. 2004. № 3. С. 68–70.
4. Сизоненко О.Н., Хвоцан О.В. К вопросу электроразрядных технологий интенсификации притока нефти в скважинах // Электронная обработка материалов. 2003. № 5. С. 80–85.
5. Балохин Б.В., Джантимиров Х.А. Новые электроразрядные технологии в геотехническом строительстве // ОФМГ. 1998. № 4, 5. С. 47–52.
6. Наугольных К.А., Рой М.А. Электрический разряд в воде. М., 1971.
7. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкости. Томск: Изд-во ТПИ, 1975. 256 с.
8. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев, Наукова думка, 1986. 206 с.
9. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. Л.: Наука, 1995. 277 с.
10. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. 324 с.
11. Минеральные новообразования на водозаборах Томской области // Под редакцией Д.С. Покровского. Томск: Изд-во НТЛ, 2002. 176 с.
12. Курец В.И., Филатов Г.П., Юшков А.Ю. Потери энергии при электрическом импульсном пробое водоцементных смесей // Электронная обработка материалов. 2003. № 5. С. 80–85.

Поступила 01.11.05

## Summary

The results of accounts of parameters of the generator for restoration of work of filters of clearing from connections of iron from underground of water are submitted. It is shown, that restoration of properties of filtering loading and clearing of drainage pipes of amplitude of a voltage of a pulse should make (30–50) kV, energy of a pulse – (300–700) J, length of a working interval – (0,5–2) sm.

---