

УДК 531; 53.043; 53.097

С.Е. Сакипова

### К РАСЧЕТУ ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В НЕОДНОРОДНОЙ ЖИДКОСТИ

Исследуется эволюция импульсного давления, которое создается электрическими разрядами в неоднородной жидкости. Расчетные формулы выводятся из уравнения теплового баланса. Показано, что мощность выделяемой энергии может быть определена на основе компьютерного анализа осциллограмм тока, полученных при электрогидравлической обработке различных гетерогенных сред.

**Ключевые слова:** импульсное давление, электрический разряд, неоднородная жидкость, хаотические колебания, нелинейный процесс, самоорганизация, корреляции, энергетический спектр мощности, система динамических уравнений

Импульсы высокого давления, образующиеся при электрических разрядах в жидкостных средах, обуславливают их широкое прикладное значение во многих технологиях. Актуальность и прикладное значение исследования закономерностей развития электроимпульсных разрядов в неоднородной жидкости обоснованы необходимостью определения наиболее оптимальных, экономичных режимов обработки водных растворов и суспензий при дроблении различных природных минералов.

Электрический разряд в жидкой среде сопровождается образованием ударных волн с большой амплитудой давления на фронте, которое и используется в качестве мощного источника механической энергии с высоким коэффициентом полезного действия [1, 2]. Возмущения, вносимые в рабочую среду внешними источниками, в данном случае высоковольтными электрическими разрядами, оказывают влияние на свойства рабочей среды, в ней происходят фазовые и структурные превращения. Рабочая среда, представляющая собой неоднородную жидкость, турбулизуется, так как насыщается парами, в ней образуются газовые пузырьки, растворяются и перемешиваются отслаиваемые в процессе дробления и разрушения дисперсные частички твердых пород [3]. Все эти аспекты оказывают существенное влияние на амплитуду и частоту мощных импульсных давлений, и при расчетах это необходимо учитывать. Гидродинамические процессы, сопровождающие электрические разряды в неоднородной жидкости и воздействующие на свойства самой среды, являются примером проявления структурных свойств турбулентного перемешивания, которые наблюдаются при высокоградиентном изменении теплофизических параметров почти мгновенно  $\sim (10^{-4} \div 10^{-6})$  с. По отдельности исследовать детали проявления структурных свойств турбулентного перемешивания практически невозможно. Здесь необходимо целостное рассмотрение нелинейных процессов, сопровождающих электроразрядные воздействия в неоднородной жидкости на основе термодинамического анализа.

**Динамика давления с учетом изменения структурных свойств неоднородной жидкости**

Рассмотрим задачу расчета эволюции импульсного давления с учетом влияния степени неоднородности рабочей среды на основе универсального уравнения теплового баланса в дифференциальной форме:

$$dQ(t) = \frac{d(PV)}{\kappa - 1} + PdV, \tag{1}$$

где  $Q(t)$  – энергия, выделяемая при электрическом разряде;  $P$  – давление рабочей среды;  $V$  – объем канала разряда;  $\kappa$  – показатель политропы.

Поделив обе части уравнения на  $dt$ , получим выражение для расчета мощности  $N(t)$ :

$$N(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot \left[ P(t) \frac{dV}{dt} + V(t) \frac{dP}{dt} \right] + P(t) \frac{dV}{dt} \tag{2}$$

или

$$N(t) = \frac{1}{\kappa - 1} (V\dot{P} + \kappa P\dot{V}). \tag{3}$$

Здесь динамика изменения импульсного давления учитывается вторым слагаемым в скобках в (3). В расчетах входящее в формулу (3) значение давления  $P$  на первом шаге можно приравнять максимальному значению давления на фронте ударной волны, которое определяется из условий для адиабаты Гюгонио:

$$P = \frac{2\rho_0}{\kappa + 1} u^2 = C_\kappa \dot{x}^2, \tag{4}$$

где  $C_\kappa = \frac{2\rho_0}{\kappa + 1}$  – коэффициент, учитывающий физические свойства неоднородной жидкости с плотностью  $\rho_0$  в невозмущенном состоянии;  $x$  – пространственная координата;  $u = \frac{dx}{dt} = \dot{x}$  – скорость распространения ударной волны.

В общем случае объем пространства определяется объемом канала, в котором происходит распространение ударной волны и может быть определен как

$$V_n = C_n \cdot x^n, \tag{5}$$

где  $C_n$  – коэффициент, зависящий от геометрических параметров канала распространения ударной волны;  $n = 1, 2, 3$  – соответственно для плоского, цилиндрического и сферических случаев.

Более сложные геометрические формы канала разряда (конические и др.) можно учесть через коэффициент  $C_n$ . Подставляя выражения (4), (5) в (3), получим для расчета эволюции давления и скорости распространения ударной волны следующую систему:

$$\begin{cases} \dot{P} = \frac{\kappa - 1}{C_n x^n} N(t) - \kappa n C_\kappa C_n x^{n-1} \dot{x}^2, \\ \dot{x} = \pm \sqrt{\frac{P}{C_\kappa}}. \end{cases} \tag{6}$$

В полученных дифференциальных уравнениях (6) значения показателя политропы  $\kappa$  и мощности выделяемой энергии  $N(t)$  уточняются по результатам экспериментальных данных.

На практике при электрогидравлической обработке дисперсных сред и минералов в качестве рабочей среды часто используется техническая вода, которая всегда содержит пузырьки воздуха или примеси. Содержание воздуха или примесей незначительно и практически не меняют ее плотность, но при импульсном воздействии способствуют сильному изменению ее структурных свойств. В случае многокомпонентной среды имеющиеся в потоке жидкости мелкие твердые частицы или газовые пузырьки скапливаются в отдельных местах и кластеризуются, образуя некоторые структуры. Образованные структуры неустойчивы и постоянно меняются или дробятся, но при относительно медленных скоростях могут достаточно долго сохранять свою форму с одновременным движением по потоку. В потоке жидкости процесс кластеризации сопровождается сбалансированным с ним процессом распада и каскадного дробления структур. При этом с ростом дисперсности среды мелкие частицы самоорганизуются и, слипаясь, образуют кластеры, в то время как крупные структуры – дробятся и распадаются. В неоднородных многофазных средах даже столь быстропеременные процессы нельзя считать адиабатическими, так как в результате структурной перестройки среды меняется ее энтропия, и процесс не является изоэнтروпийным. Поэтому при термодинамическом описании реальных процессов более корректно пользоваться уравнением политропического процесса

$$PV^{\kappa} = \text{const.} \quad (7)$$

Показатель политропы  $\kappa$ , учитывающий изменение структурных свойств неоднородной среды, можно определить через мультифрактальные характеристики [4]. При отсутствии взаимодействия структур для неидеальной жидкости для определения  $\kappa$  можно воспользоваться формулой

$$\kappa = \frac{i+2}{i}, \quad (8)$$

совпадающей по форме с формулой для показателя адиабаты.

Но здесь  $i$  – степень свободы не молекулярного уровня движения, а движения макроскопических структур – вихрей или кластеров частиц в неоднородной жидкости. Известна общепринятая оценка числа макроскопических степеней свободы в инерционной самоподобной области турбулентности:

$$i \approx \left(\frac{r_m}{r_0}\right)^3 \sim \left(\frac{Re}{Re^*}\right)^{9/4}, \quad \frac{r_m}{r_0} \sim \left(\frac{Re}{Re^*}\right)^{3/4}, \quad Re^* \leq Re < \infty, \quad (9)$$

где  $r_m, r_0$  – наибольший и наименьший пространственные масштабы движения (в пределе определяются масштабами канала разрядного пространства);  $Re, Re^*$  – число Рейнольдса и его критическое значение.

В [3] проведены расчеты по (9), где при изменении  $i$  в пределах  $1 \leq i \leq \infty$ , получен диапазон изменения показателя политропы  $1 \leq \kappa \leq 3$ , соответствующий экспериментально установленному. Формула (9) следует из условия каскадного самоподобного деления вихрей, ее можно рассматривать и как результат вычисления фрактальной меры – некоторого объема, характеризуемого дробной размерностью  $9/4$ . Формулы (9) могут быть использованы при расчете конкретного реального, неравновесного процесса, протекающего в неоднородной жидкости на основе термодинамического приближения.

### Расчет мощности электроразрядного процесса

Известно, что закон расширения границы полости разряда полностью определяется термодинамическими свойствами среды и режимом выделения мощности  $N(t)$  электрической энергии, превращаемой в тепло. Вид функции  $N(t)$  был определен с учетом зависимости электрических свойств рабочей среды от происходящего в ней электроразрядного процесса. При этом использовалось решение уравнения нелинейного колебательного контура [3], из которого выражение для расчета мощности  $N(t)$  выделяемой энергии найдено в виде

$$N(t) = IU = \alpha_1 \left( \frac{L}{C} \right)^{1/2} \left[ I(t)^2 + \frac{\beta}{3} I(t)^4 \right], \quad (10)$$

где  $L$ ,  $C$  – индуктивность и емкость контура;  $U(I)$  – нелинейное напряжение, зависящее от силы тока  $I$ ;  $\alpha_1$ ,  $\beta$  – константы, характеризующие электрическое сопротивление среды;  $t$  – время.

Выражение (10) в первоначальном приближении удовлетворительно описывает осциллирующий и затухающий вид импульсного тока при однократном электроразрядном воздействии. Но на практике при обработке многокомпонентных сред электрические разряды повторяются с определенной частотой до получения желаемого результата, к примеру дробления дисперсных частиц заданных размеров. Исследование динамики импульсного давления сводится к определению закономерностей эволюции импульсного тока при электрогидравлическом воздействии в неоднородной жидкости, по величине которого можно рассчитать мощность выделяемой энергии  $N(t)$ .

В зависимости от электрических параметров разрядной цепи длительность разряда в жидкости может изменяться от  $10^{-5}$  до  $10^3$  мкс. Получение разрядов различной временной длительности связано с определенными затруднениями и иногда требует применения особых методик создания импульсного давления в различных жидкостных средах. В экспериментах [5] работа генератора импульсных токов реализована с помощью эквивалентной схемы колебательного контура, содержащего генератор импульсов, переменную электрическую емкость  $C$ , сопротивление  $R$  и индуктивный элемент  $L$ .

В качестве рабочей неоднородной среды использовались водные растворы различных природных минералов, углей и др., которые подвергались электрогидравлической обработке при различных параметрах разрядного контура. Диапазон изменения параметров в проведенных экспериментах составляет: по напряжению  $U$  (1,5 ÷ 3,0) кВ, емкости накопителя  $C$  – (0,10 ÷ 0,25) мкФ; межэлектродному расстоянию  $l$  – (0,5 ÷ 12) мм; частоте следования разрядов  $\nu$  – (1,5 ÷ 2,0) Гц. Погрешность измерения импульсного тока и напряжения ~3 – 5 %. В ходе проведения экспериментов была разработана методика измерения импульсов тока длительностью 0,32 – 0,64 мс с помощью цифрового осциллографа Velleman PCS-500 с программным обеспечением PC Lab-2000.

Используемый при измерениях пьезометрический датчик позволил измерять импульсы давления с амплитудой, достигающей величину порядка 50 – 60 бар и очень малой длительностью сигналов ~0,001 с. Измерительный датчик протарирован динамическим методом, относительный разброс экспериментальных точек составляет около 5 – 7 %. На рис. 1 представлена временная развертка напряжения разрядного контура  $U = f(t)$ . Сравнительно низкая частота следования

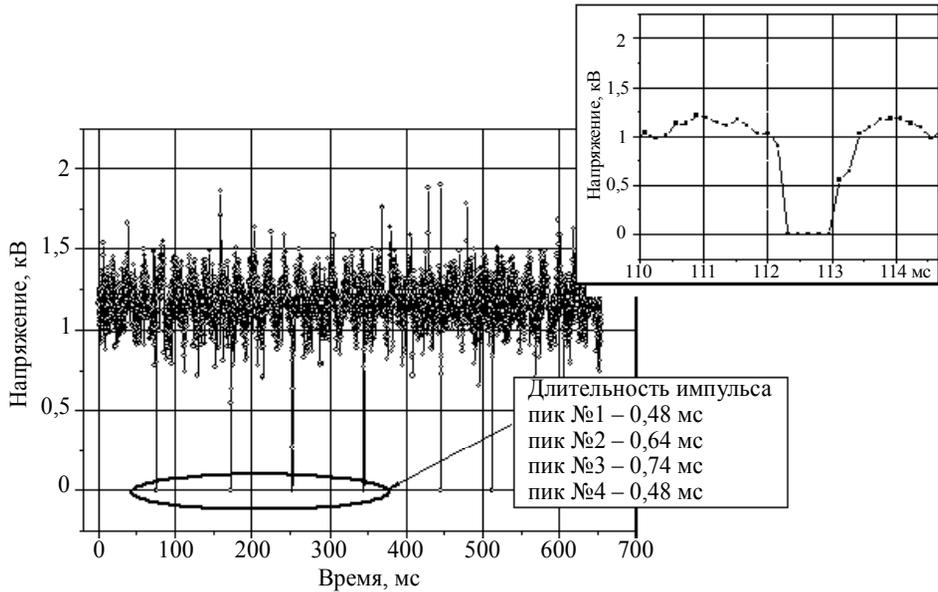


Рис. 1. Зависимость  $U = f(t)$  при  $C = 0,10$  мкФ,  $l = 1,5$  мм

импульсов позволяет наблюдать пики всех импульсов, при этом можно видеть повторяющиеся одинаковые импульсы с длительностью 0,48 мс и 0,64 мс и определить разность измеренных пиков, которая составляет 0,16 мс. Пики таких длительностей аperiodически чередуются независимо от выбранных значений параметров разрядного контура.

Высокий уровень развития современной компьютерной техники позволяет быстро и точно получить необходимую информацию о самых сложных и быстромеющихся процессах. Тем не менее выявление каких-либо закономерностей распространения быстропеременных и высокоградиентных процессов требует применения специальных методов компьютерной обработки данных. Для расчета статистических характеристик в базу *work* пакета *MatLab* были введены измеренные значения импульсов тока, полученные при электрогидравлической обработке различных гетерогенных сред. По временным разверткам сигналов импульсного тока с помощью стандартных функций  $\text{xcorr}(X1)$  и  $\text{fft}(X1,512)$  рассчитаны и построены графики коэффициентов корреляции и энергетические спектры мощности (рис. 2).

### Моделирование генератора стохастических колебаний импульсного тока

Для теоретического описания хаотических колебаний успешно используется система «динамических» уравнений, решение которых позволяют определить параметры различных режимов работы колебательного контура [6]. В случае линейной зависимости сопротивления от температуры, т.е. при протекании процесса теплообмена по закону Ньютона, можно ввести безразмерные переменные и получить для описания динамики тока в цепи колебательного контура следующую систему уравнений:

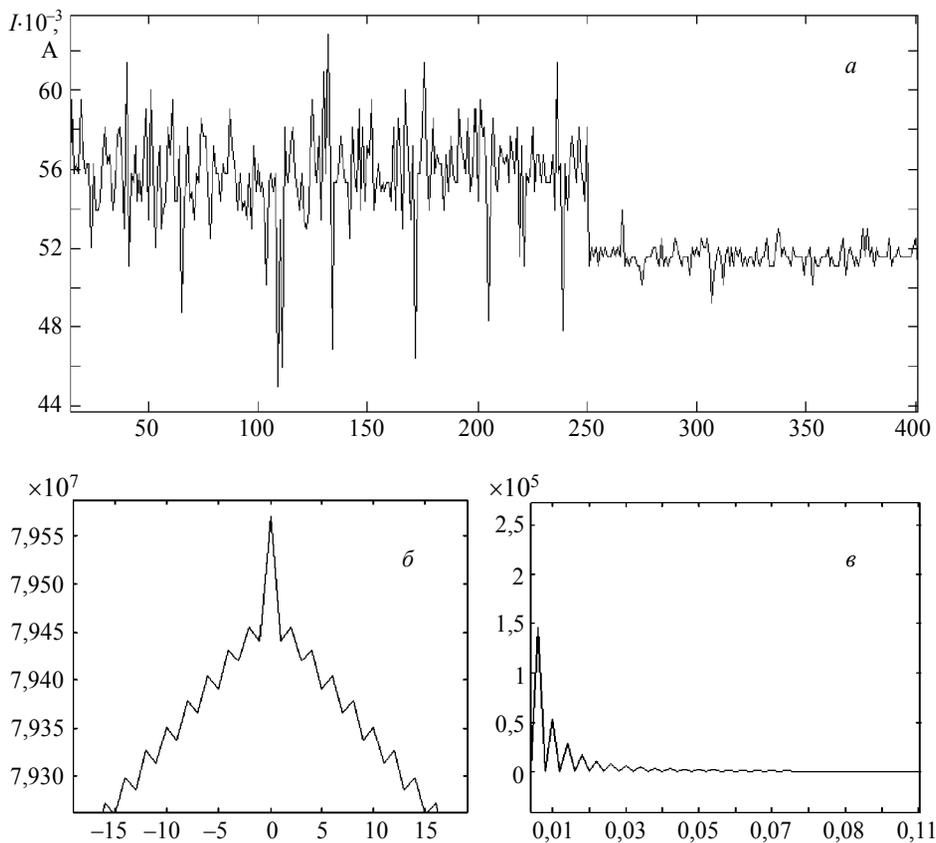


Рис. 2. Временная развертка низкочастотных импульсных сигналов (а), коэффициент корреляции (б) и энергетический спектр мощности (в)

$$\begin{cases} \dot{x} = (m - z) \cdot x + y; \\ \dot{y} = -x; \\ \dot{z} = g \cdot (x^2 - z), \end{cases} \quad (11)$$

где  $x$  – характеризует ток в цепи колебательного контура;  $y$  – ток в цепи обратной связи;  $z$  – параметр нелинейного преобразователя, обеспечивающего задерживающий сигнал;  $m$  – параметр усиления селективного элемента  $x(t)$ ;  $g$  – параметр инерционности.

Решение системы динамических уравнений (11) при определенных значениях констант хорошо описывает стохастические колебания реального генератора с инерционной нелинейностью. Эквивалентная схема не содержит нелинейных элементов, поэтому уравнения можно свести с помощью простых преобразований к системе уравнений модифицированного генератора с инерционной нелинейностью, которая в предельном случае вырождается в двумерную, соответствующую классическому генератору Ван дер Поля. Реальный генератор колебаний имеет инерциальную нелинейность, область значений параметра инерционности  $g$  ограничена некоторым интервалом, сами значения параметров могут флуктуировать.

Для учета нелинейности систему (11) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{cases} \dot{x} = (m - \mu \cdot z) \cdot x + y; \\ \dot{y} = -x; \\ \dot{z} = g \cdot (J(x) \cdot x^2 - z); \end{cases} \quad J(x) = \begin{cases} 1, x > 0 \\ 0, x < 0 \end{cases}, \quad (12)$$

где  $J(x)$  – функция Хевисайда.

В системе (12) параметр  $\mu$  введен как коэффициент усиления, регулирующий значение напряжения в цепи обратной связи  $z$ . В работе [6] указано, что для инерционного генератора относительная частота нелинейного преобразователя  $g < 1$ .

Но в данном случае необходимый режим можно обеспечить при значениях  $g > 1$  и затем провести оценку возможных значений остальных параметров цепи. Тогда система динамических уравнений преобразуется к следующему виду:

$$\begin{cases} \dot{x} = (m - \mu \cdot z) \cdot x + \frac{y}{1 + D \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)}; \\ \dot{y} = -x; \\ \dot{z} = g \cdot (J(x) \cdot x^2 - z), \end{cases} \quad (13)$$

где  $g \geq m$  – отношение частоты нелинейного приемника и колебательного контура.

Особенность системы (13) в том, что вместо параметра  $k(t)$  введена функция, описывающая динамику импульсного тока в виде явной косинусоидальной зависимости, которую можно также трактовать как режим подачи импульсного

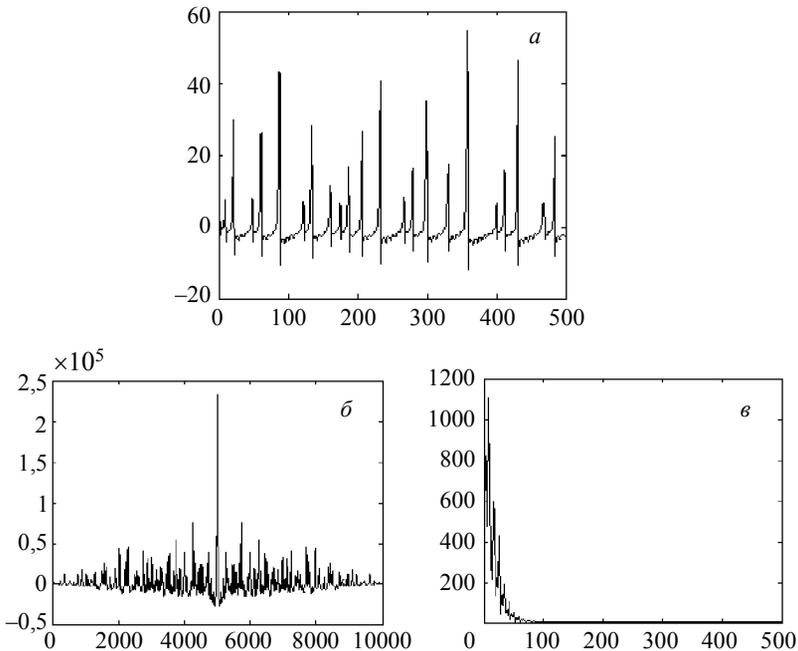


Рис. 3. Временная развертка расчетного импульсного тока (а), коэффициент корреляции (б) и энергетический спектр мощности (в)

напряжения от генератора. В [7] показано, что малая инерционность нелинейного преобразователя ( $g > 1$ ) может быть непосредственно реализована на практике.

Режим и форму импульсных сигналов можно регулировать варьированием значений констант  $m$ ,  $g$ ,  $D$ ,  $\mu$ , которые характеризуют параметр возбуждения, пропорциональный разности вносимой и рассеиваемой энергий в контуре, параметр инерционности генератора и др. Решение системы динамических уравнений (13) получено методом Рунге-Кутты четвертого порядка с помощью пакета MatLab 6/5. Предварительно, в блоке «work» описываются вычисляемые функции, вводятся начальные значения констант. В результате расчетов получены решения, описывающие динамику импульсного тока. На рис.3 приведены расчетные графики при следующих значениях параметров:  $m = 1,5$ ;  $g = 2,3$ ;  $\omega = 0,95$ ;  $D = 0,85$ ;  $\mu = 1,5$ .

### Заключение

Таким образом, в результате расчетов найдены параметры, определяющие закономерности развития импульсного давления в гетерогенном потоке в результате электрического разряда с учетом изменения свойств самой среды. Исследование динамики давления сводится к определению закономерностей эволюции импульсного тока при электрогидравлическом воздействии в неоднородной жидкости, по величине которого можно рассчитать мощность выделяемой энергии. Использование системы динамических уравнений для моделирования нелинейных сигналов импульсного давления позволит варьированием параметров цепи определить оптимальные режимы электрогидравлической обработки гетерогенных жидкостных сред.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Бескаравайный Н.М.* Теоретические основы импульсных давлений в жидких средах. Киев: Наукова думка, 1977. 98 с.
2. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка, 1986. 205 с.
3. *Кусаиынов К.* Гидродинамика, теплообмен и электрогидравлические явления при движении двухфазных сред в трубах. Караганда: КарГУ, 1998. 114 с.
4. *Жанабаев З.Ж.* Мультифрактальные закономерности турбулентного переноса в гетерогенных средах // Вестник КарГУ. Караганда: КарГУ, 2003. № 1. С. 43 – 52.
5. *Kusaiynov K., Sakipova S.E., Satybaldin N.M.* Dynamics of Pulsed electric discharge development in the heterogeneous environment // Eurasian Phys. Tech. J. Karaganda: KarSU, 2006. V. 3. No. 1(5). P.31 – 34.
6. *Жанабаев З.Ж., Манапбаева А.Б.* Численное моделирование работы генератора широкополосного, высокочастотного динамического хаоса // Сб. трудов 5-й Междунар. науч. конф. «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование». Алматы: Қазақ унив-ті, 2007. С. 184 – 185.
7. *Жанабаев З.Ж., Тарасов С.Б., Алмасбеков Н.Е., Манапбаева А.Б.* Радиотехнический генератор динамического хаоса с фазовым управлением // Материалы 6-й Междунар. науч. конф. «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент». Астана: ЕНУ, 2008. С. 20 – 24.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

**САКИПОВА Сауле Еркешевна** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой общей и теоретической физики Карагандинского государственного университета им. Е.Б. Букетова (Республика Казахстан). E-mail: adema2001@mail.ru

Статья принята в печать 05.02.2009 г.