

УДК 621.3.011.72: 621.3.015.52

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЫХОДНОЙ ЦЕПИ ГЕНЕРАТОРА РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ С НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛЬЮ ПЛАЗМОЭРОЗИОННОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИХ ПАРАМЕТРОВ В ШИРОКИХ ДИАПАЗОНАХ**

**Н.А.Шидловская**, чл.-корр. НАН Украины, **С.Н.Захарченко**, докт.техн.наук, **А.П. Черкасский**  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.  
E-mail: shydlovska@mail.ua, snzakhar@bk.ru, cherkasa@bk.ru

*В программной среде Matlab Simulink проведено моделирование переходных процессов в выходной цепи генератора разрядных импульсов с нелинейной моделью плазмоэрозионной нагрузки, адекватной в широких диапазонах изменения их параметров. В результате моделирования получены и проанализированы зависимости от времени, а также от амплитуды импульсов напряжения и значений реактивных элементов выходной цепи генератора основных параметров разрядных импульсов и их производных. Впервые рассчитаны зависимости от времени и амплитуды импульсов напряжения значения зарядов, прошедших через плазменные каналы и рабочую жидкость. На основе анализа зависимостей их отношений определены диапазоны изменения напряжения и длительности импульсов, в которых его удельное электрохимическое действие минимально. Составлена карта электрических режимов плазмоэрозионной обработки гранулированной токопроводящей среды и разработаны рекомендации по управлению гранулометрическим составом плазмоэрозионных частиц.*

Библ. 18, рис. 10, табл. 1.

**Ключевые слова:** нелинейное сопротивление, разрядные импульсы, гранулированные токопроводящие среды, плазменные каналы, моделирование.

**Введение.** Оптимизация режимов технологических процессов импульсной плазмоэрозионной обработки гранулированных токопроводящих сред (ГТПС) [1, 4–18] с целью повышения их эффективности и расширения возможностей, а также синтез выходных цепей генераторов импульсов, работающих на такие нагрузки, и расчет параметров таких систем крайне затруднительны без моделирования электромагнитных процессов в них. Поэтому адекватное моделирование и анализ переходных процессов в таких цепях при изменении их параметров и начальных условий в широких диапазонах, а также разработка на его основе рекомендаций, направленных на повышение качества получаемой продукции и снижение ее энерго- и ресурсоемкости, является актуальной и важной задачей и составляет **цель** настоящей работы.

**1. Условия численного эксперимента.** Для достижения поставленной цели в программной среде Matlab Simulink была создана модель выходной цепи генератора импульсов с емкостным накопителем энергии и нелинейной моделью плазмоэрозионной нагрузки, адекватной в широких диапазонах изменений амплитуды напряжения и длительности разрядных импульсов, которая детально описана в [2]. Там же была приведена оценка адекватности модели в широком диапазоне изменения напряжения разрядных импульсов. Математические модели компонентов плазмоэрозионной нагрузки детально описаны в [3]. Там же описаны материал, форма и размеры гранул ГТПС, состояние их поверхности, рабочая жидкость, а также форма и размеры межэлектродного промежутка, для которых рассчитаны параметры моделей нагрузки. При этом впервые были получены зависимости их параметров от напряжения и частоты импульсов в широких диапазонах их изменения.

В ходе моделирования варьировались основные параметры выходной цепи генератора разрядных импульсов и начальные условия в следующих пределах: индуктивность разрядного контура  $L$  от 0,5 до 10 мкГн, емкость рабочего конденсатора  $C$  от 10 до 400 мкФ, амплитуда напряжения разрядных импульсов  $U_m$  регулировалась изменением начальных условий на конденсаторе и изменялась от 40 В, что соответствовало появлению первых плазменных каналов в слое гранул, до 390 В, что соответствовало развитым искровым каналам между всеми последовательно соединенными каналами проводимости гранулами слоя [2, 3].

**2. Результаты моделирования и анализ зависимостей основных параметров разрядных импульсов от начальных условий и параметров цепи.** Полученная в результате моделирования при  $L=1,8$  мкГн зависимость значений длительности разрядных импульсов  $\tau$  от амплитуды их напряжения  $U_m$  для различных значений емкости рабочего конденсатора  $C$  показана на рис. 1. Изменение  $L$  в диапазоне от 0,5 до 10 мкГн не привело к значительным изменениям расчетной длительности импульсов, поэтому зависимость  $\tau(L)$  тут не приводится, хотя увеличение  $L$  с 1,8 до 10 мкГн при  $U_m=250$  В и  $C=400$  мкФ вызывает рост  $\tau$  от 897 до 926 мкс. Вид зависимости  $\tau(U_m)$  повторяет приведенный в [3] вид зависимости линейной составляющей активного сопротивления плазменных каналов  $R_l(U_m)$ . Это объясняется тем, что длительность рассматриваемого переходного процесса аperiodического разряда конденсатора  $C$  пропорциональна постоянной времени цепи  $C \cdot R_l$ . Поскольку, согласно выбранной модели, при  $U_m=250$  В сопротивление  $R_l$  принимает свое максимальное значение 1,5 Ом [3], то при этом напряжении наблюдается максимальная длительность импульса.

Временные зависимости значений скоростей изменения напряжения  $du/dt$  (окружности и сплошная линия) и тока  $di/dt$  (треугольники и штриховая линия) при  $U_m=110$  В, а также мощности  $dp/dt$  при  $L=1,8$  мкГн и  $C=50$  мкФ показаны на рис. 2, а и б соответственно. Увеличение амплитуды напряжения импульсов слабо влияет на форму кривых на рис. 2, а, но увеличивает их размах. Наиболее значительные их изменения соответствуют переднему фронту импульса. Сказанное выше справедливо и для кривых рис. 2, б. Таким образом, наибольшая динамика электромагнитных процессов наблюдается на переднем фронте импульсов, что способствует возникновению электро-, газо- и термодинамических сил, под действием которых происходит отделение расплавленных порций металла гранул от их поверхности. Зависимости максимальных значений скоростей изменения напряжения, тока и мощности разрядных импульсов в ГПС от амплитуды их напряжения, а также емкости и индуктивности разрядного контура показаны на рис. 3, а, б и в соответственно.

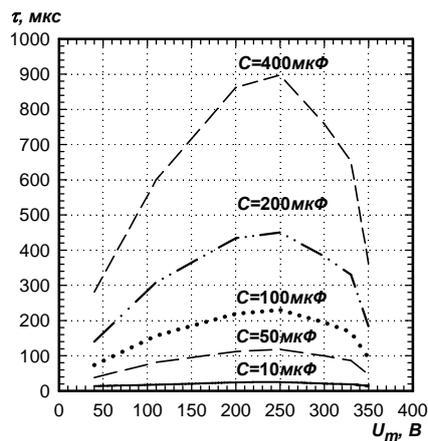


Рис. 1

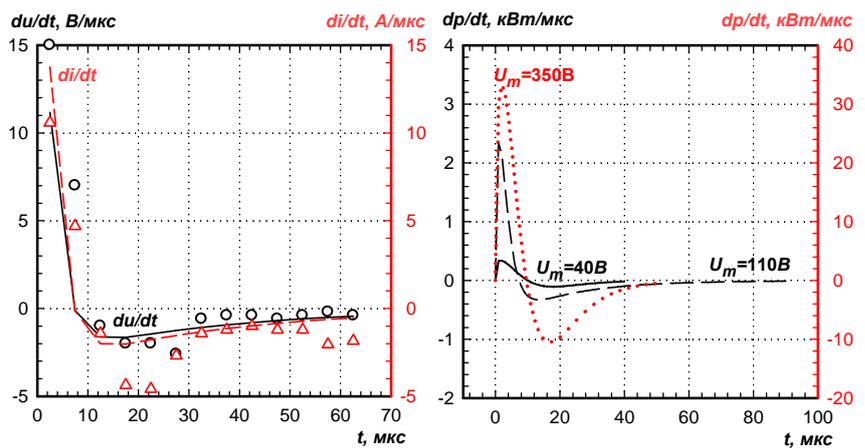


Рис. 2

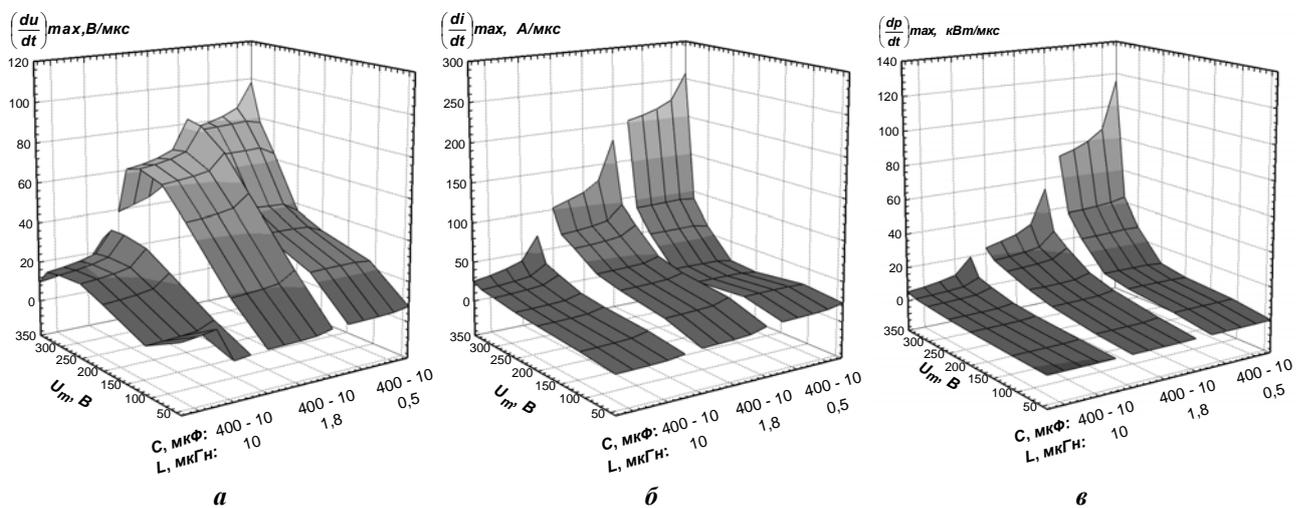


Рис. 3

Как следует из рис. 3, уменьшение как индуктивности  $L$ , так и емкости  $C$  разрядного контура способствует увеличению всех трех рассматриваемых параметров, что объясняется увеличением частоты его собственных колебаний  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ . Зависимость скорости изменения напряжения нагрузки от амплитуды напряжения имеет локальный экстремум. Особенно ярко он виден при  $L=1,8$  мкГн и  $U_m=250$  В. Заметим, что напряжению  $U_m=250$  В соответствуют наибольшие значения  $R_l$  [3] и  $\tau$  (рис. 1).

Зависимости значений мгновенной мощности импульсов  $p$  от времени при  $L=1,8$  мкГн,  $C=50$  мкФ,  $U_m=40, 110$  и  $350$  В показаны на рис. 4. Передний фронт данных зависимостей круче, чем задний, что объясняется характером зависимости сопротивления ГТПС от протекающего в ней тока. Амплитуда мощности увеличивается с ростом напряжения импульсов быстрее, чем на линейном сопротивлении, а длительность импульса определяется зависимостью рис. 1.

Зависимости значений средней мощности импульсов  $P_{CP} = \tau^{-1} \int_0^\tau u(t) \cdot i(t) dt$  и ее отношения к их длительности от амплитуды напряжения, емкости рабочего конденсатора и индуктивности разрядного контура показаны на рис. 5, а и б соответственно. Как видно из рис. 5, наибольшая чувствительность зависимости средней мощности импульсов наблюдается к амплитуде их напряжения. При ее значениях до 250 В средняя мощность слабо зависит от емкости и индуктивности контура, а при более высоких напряжениях она заметно увеличивается с уменьшением  $L$  и  $C$ , т.е. с увеличением  $\omega_0$ . Зависимость отношения средней мощности импульсов к их длительности от тех же параметров ведет себя аналогично зависимости средней мощности, однако она проявляет большую чувствительность к емкости рабочего конденсатора и так же, как и зависимость скорости изменения мощности (рис. 3, в), может быть использована для поиска эффективных режимов управления дисперсностью плазмо-эрозионных частиц.

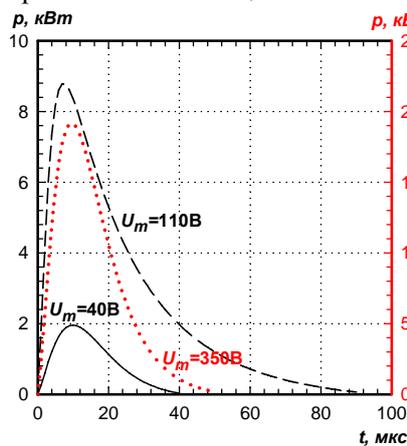
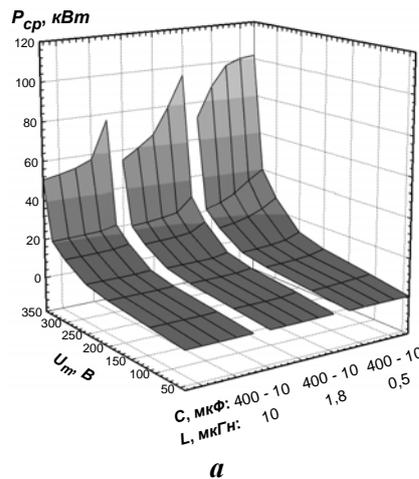
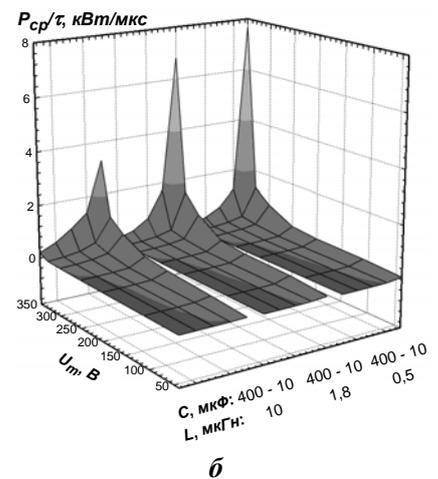


Рис. 4



а



б

Рис. 5

Временная зависимость энергии импульса в ГТПС  $w(t) = \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt$  при  $L=1,8$  мкГн,  $C=50$  мкФ и  $U_m=40, 110$  и  $350$  В показана на рис. 6. Как видно из совместного анализа графиков рис. 6 с рис. 1 и рис. 4, порядка 80% энергии передается в нагрузку до середины продолжительности импульса, что свидетельствует об основном вкладе его переднего фронта в процессы преобразования энергии в ГТПС. Зависимость полной энергии, которая передается в ГТПС в течение всей продолжительности импульса,  $W_{max} = \int_0^\tau u(t) \cdot i(t) dt$  при  $L=1,8$  мкГн от амплитуды его напряжения показана на рис. 7. Как следует из рис. 7, данная зависимость чувствительна как к емкости конденсатора, так и к напряжению импульсов, особенно при их значениях свыше 300 В.

Временные зависимости зарядов, прошедших в течение разрядного импульса через плазменный канал  $q_S(t) = \int_0^t i_S(t) dt$ , через рабочую жидкость  $q_F(t) = \int_0^t i_F(t) dt$ , и их отношение при

$L=1,8$  мкГн,  $C=50$  мкФ и  $U_m=40, 110$  и  $350$  В показаны на рис. 8, а, б и в соответственно. Как следует из совместного анализа графиков рис. 8, а и рис. 1, свыше 70% всего заряда, прошедшего через плазменный канал, приходится на первую половину его длительности, что обусловлено формой разрядного тока. В то же время, распределение в течение импульса заряда, прошедшего через рабочую жидкость, носит более равномерный характер (рис. 8, б).

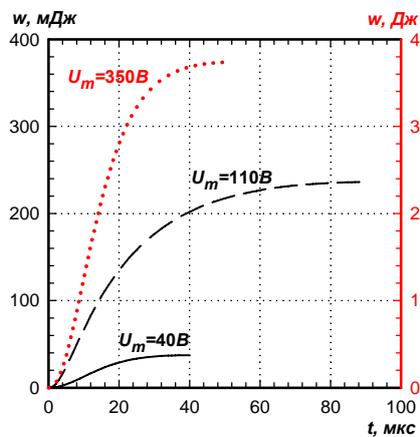


Рис. 6

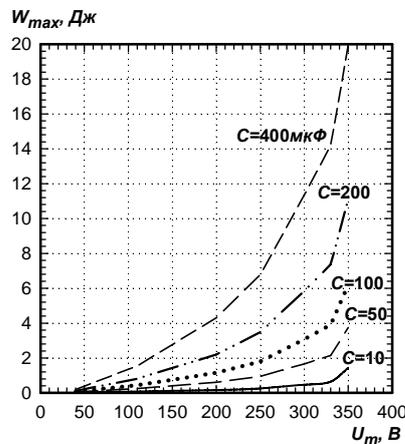
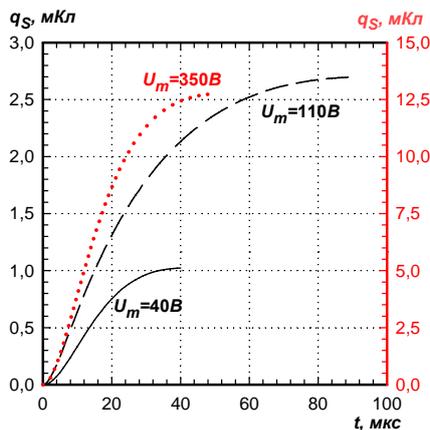
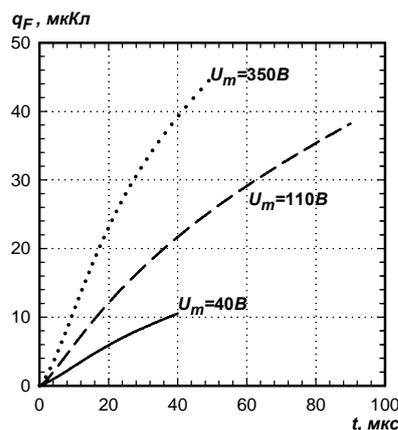


Рис. 7

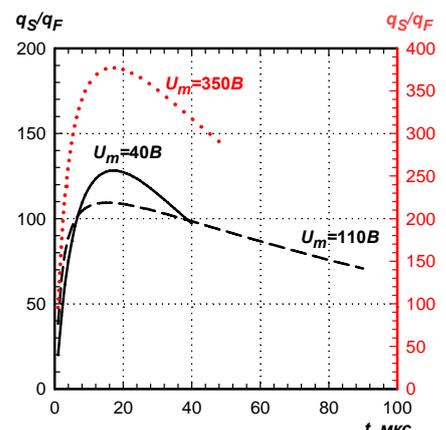
Временная зависимость соотношения этих зарядов (рис. 8, в) имеет ярко выраженный экстремум в момент времени, приблизительно в 2 раза превышающий время достижения напряжением своего максимума (рис. 2, а). Следовательно, для существенного снижения доли электрохимического действия разрядного тока, его целесообразно прерывать сразу после наступления указанного момента времени.



а



б



в

Рис. 8

Зависимости от напряжения импульсов зарядов, прошедших за время их полной продолжительности через плазменный канал  $q_{S\max} = \int_0^{\tau} i_S(t)dt$ , рабочую жидкость  $q_{F\max} = \int_0^{\tau} i_F(t)dt$ , и их отношения

$q_{S\max}/q_{F\max}$  при  $L=1,8$  мкГн показаны на рис. 9, а, б и в соответственно. При изменении  $L$  от 0,5 до 10 мкГн данные зависимости практически не изменялись, поэтому тут не приводятся. Как следует из рис. 9, а, зависимость заряда, прошедшего через плазменный канал, монотонно возрастает как с увеличением напряжения импульсов, так и с увеличением емкости рабочего конденсатора. Зависимость заряда, прошедшего через рабочую жидкость (рис. 9, б), монотонно возрастает с увеличением емкости рабочего конденсатора, однако имеет ярко выраженный экстремум при изменении амплитуды напряжения импульсов, приходящийся на значение аргумента 250 В. Такой вид зависимости, очевидно, обусловлен зависимостью от амплитуды напряжения сопротивления  $R_l$  [3], которое в схемах замещения плазмозероэрозийной нагрузки [2, 3] шунтирует сопротивление рабочей жидкости.

Вследствие монотонности зависимости  $q_{S\max}(U_m)$  и наличия экстремума зависимости  $q_{F\max}(U_m)$ , зависимость их отношения  $q_{S\max}/q_{F\max}(U_m)$  (рис. 9, в) имеет локальный инфимум при  $U_m=200$  В. При таких значениях напряжения импульсов удельный вес электрохимического действия разрядного тока является самым высоким, поэтому их желательно избегать, чтобы не допускать чрезмерного загрязнения рабочей жидкости продуктами ее электролиза и электрохимического растворения металла гранул и анода. Из рис. 9, в следует, что величина емкости рабочего конденсатора не влияет на рассматриваемое отношение. С точки зрения уменьшения электрохимического загрязнения рабочей жидкост-

ти следует выбирать амплитуду напряжения разрядных импульсов либо свыше 300 В, либо менее 150 В.

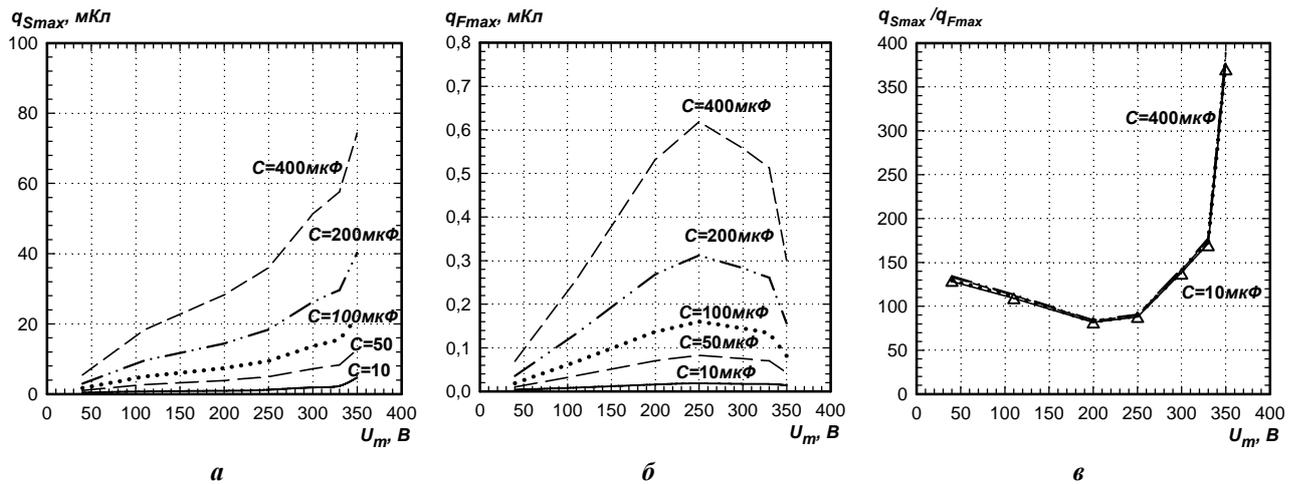


Рис. 9

Одними из важнейших электротехнических параметров, определяющих свойства плазмозеро-зионных частиц, являются амплитуда напряжения разрядных импульсов и емкость рабочего конденса-тора генератора. Всё технически реализуемое множество их вариаций для фиксированной индук-тивности разрядного контура образует карту электрических режимов плазмозеро-зионной обработки ГТПС конкретной технологической установки. В таблице представлена сокращенная карта электри-ческих режимов плазмозеро-зионной обработки ГТПС лабораторной установки при  $L=1,8$  мкГн, на которой были проведены эксперименты, положенные в основу создания нелинейной модели сопро-тивления ГТПС [3]. В таблице представлены значения основных параметров разрядных импульсов

|             |                          | C, мкФ    |           |           |
|-------------|--------------------------|-----------|-----------|-----------|
|             |                          | 10        | 200       | 400       |
| $U_m=40$ В  | $W_{max}$ , Дж           | 0,016     | 0,106     | 0,188     |
|             | $P_{CP}$ , кВт           | 1,038     | 0,750     | 0,666     |
|             | $\tau$ , мкс             | 14        | 140       | 281       |
|             | $du/dt _{max}$ , В/мкс   | 5,422     | 2,982     | 2,762     |
|             | $di/dt _{max}$ , А/мкс   | 16,476    | 9,061     | 8,392     |
|             | $dp/dt _{max}$ , кВт/мкс | 0,57      | 0,263     | 0,24      |
|             | <b>Номер зоны</b>        | <b>№7</b> | <b>№4</b> | <b>№1</b> |
| $U_m=200$ В | $W_{max}$ , Дж           | 0,159     | 2,198     | 4,3       |
|             | $P_{CP}$ , кВт           | 6,347     | 5,053     | 4,983     |
|             | $\tau$ , мкс             | 24        | 434       | 862       |
|             | $du/dt _{max}$ , В/мкс   | 56,013    | 47,44     | 46,922    |
|             | $di/dt _{max}$ , А/мкс   | 39,695    | 33,619    | 33,252    |
|             | $dp/dt _{max}$ , кВт/мкс | 8,099     | 6,023     | 5,91      |
|             | <b>Номер зоны</b>        | <b>№8</b> | <b>№5</b> | <b>№2</b> |
| $U_m=350$ В | $W_{max}$ , Дж           | 1,433     | 11,067    | 19,891    |
|             | $P_{CP}$ , кВт           | 95,367    | 59,820    | 54,644    |
|             | $\tau$ , мкс             | 14        | 184       | 363       |
|             | $du/dt _{max}$ , В/мкс   | 68,698    | 41,499    | 38,885    |
|             | $di/dt _{max}$ , А/мкс   | 180,332   | 108,933   | 102,074   |
|             | $dp/dt _{max}$ , кВт/мкс | 53,557    | 25,889    | 23,488    |
|             | <b>Номер зоны</b>        | <b>№9</b> | <b>№6</b> | <b>№3</b> |

для девяти возможных комбинаций из трех значений амплитуды напряжения разрядных импульсов и трех значений емкости рабочего конденсатора, которые практически полностью охватывают карту электри-ческих режимов плазмозеро-зионной обработки ГТПС лабораторной установки [3]. Для удобства сравни-тельного анализа параметров разрядных импульсов каждой зоне карты, соответствующей приведенным в таблице значениям  $U_m$  и  $C$ , присвоен порядковый номер.

Зона, обозначенная в таблице, характеризуется наименьшими значениями всех производных и средней за время импульса мощности, малым значением энергии и достаточно большой длительностью импульса. Для зоны № 3 характерны наибольшие значения энергии им-пульсов, средние значения всех производных, а также средней за время импульса мощности и длительности импульсов. В зоне № 7 наблюдаются малые значения всех производных и средней за время импульса мощ-ности и наименьшие значения энергии и длительности импульсов. Зона № 9 характеризуется наибольшими зна-чениями всех производных и средней за время импульса мощности, невысоким значением энергии и наимень-шим значением длительности импульсов.

Управление дисперсностью плазмозеро-зионных частиц, повышение энерго- и ресурсоэффективности их получения за счет снижения удельного веса частиц не-

желательных размеров возможно путем корректного выбора электрических режимов технологического процесса. Повышению дисперсности плазмозеро-зионных частиц способствуют уменьшение энергии [9] и длительности импульса, повышение производных по времени его параметров, а также импульсной мощ-

ности [4]. Зона № 7 может представлять интерес для реализации режимов получения мелкодисперсных плазмозерозионных частиц в случае, если повысить значения производных по времени параметров импульса. Те же действия совместно с принудительным ограничением длительности импульсов [5] в зонах № 1 и № 4 также будут способствовать снижению размеров частиц. Для снижения размеров плазмозерозионных частиц при работе в зоне № 3 необходимо на порядки снизить значения энергии и длительности импульсов, например, их высокочастотной модуляцией, а в зоне № 9 – снизить значение энергии. Противоположные действия будут способствовать увеличению размеров плазмозерозионных частиц.

Указанные выше рекомендации были подтверждены на практике. Работа в зоне № 7 вблизи границ с зонами № 4 и № 8 позволила получить в воде мелкодисперсные частицы алюминия, что существенно повысило ресурсо- и энергоэффективность плазмозерозионной коагуляции при очистке природных и сточных вод за счет снижения массовой доли крупных (свыше 15 мкм) частиц [6]. Использование при работе в этой зоне принудительной механической активации слоя гранул в процессе их обработки привело к высокочастотной модуляции разрядных импульсов, снижению на порядок длительности и энергии их мод и обеспечило получение наноразмерных плазмозерозионных частиц биологически активных металлов [5], а также субмикронных частиц алюминия [6].

При получении плазмозерозионных частиц водородсорбирующего сплава  $Ti_{45}Zr_{38}Ni_{17}$  [14] в числе прочих задач необходимо было найти компромисс между увеличением их удельной поверхности и сохранением ими физических и электрохимических свойств массивного образца. Из-за высокой химической активности компонентов сплава выбор рабочих жидкостей, изменением которых можно было управлять распределением эрозионных частиц по размерам, был крайне ограничен. Приемлемые и стабильные во времени электрохимические результаты были получены только при использовании жидкого аргона [14]. Поэтому управление распределением частиц по размерам было возможным только за счет изменения параметров разрядных импульсов. На рис. 10, а, б, в представлены распределения по размерам плазмозерозионных частиц  $Ti_{45}Zr_{38}Ni_{17}$ , полученных в жидком аргоне при следующих параметрах:  $C=400$  мкФ,  $U_m=75$  В,  $\tau=500$  мкс;  $C=50$  мкФ,  $U_m=85$  В,  $\tau=55$  мкс и  $C=50$  мкФ,  $U_m=200$  В,  $\tau=50$  мкс, соответственно.

Как следует из рис. 10, увеличение как емкости рабочего конденсатора, так и амплитуды напряжения разрядных импульсов в описанных в [14] условиях, приводит к увеличению средних размеров плазмозерозионных частиц, что согласуется с изложенными выше рекомендациями.

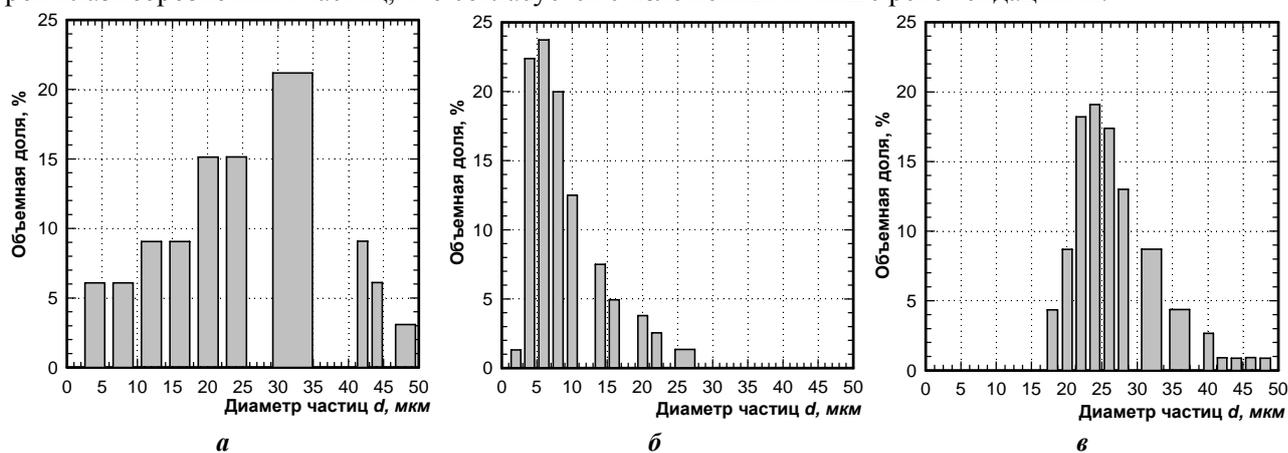


Рис. 10

**Выводы.** 1. Полученные в ходе моделирования переходных процессов результаты показали сильную зависимость длительности разрядных импульсов от их амплитуды и емкости рабочего конденсатора, а влияние на нее индуктивности разрядного контура в исследованном диапазоне незначительное. Во всех исследованных режимах зависимость длительности импульсов от амплитуды их напряжения содержала ярко выраженный экстремум при  $U_m=250$  В, что соответствует экспериментальным данным.

2. В рассмотренных режимах скорости изменения напряжения, тока и средней за время импульса мощности на переднем фронте импульса превосходят свои значения на его заднем фронте в среднем в 30 раз, поэтому принудительное ограничение их длительности существенно повышает динамику процессов. Наибольшее влияние на величину рассматриваемых производных оказывает напряжение им-

пульсов. Увеличение частоты собственных колебаний разрядного контура также способствует увеличению всех трех производных.

3. Средняя за время импульса мощность при значениях амплитуды напряжения разрядных импульсов до 200 В слабо зависит от значений индуктивности и емкости контура. При более высоких напряжениях эта мощность возрастает с увеличением частоты собственных колебаний контура.

4. Свыше 70% всего заряда, прошедшего через плазменный канал, приходится на первую половину его длительности, в то время как заряд, прошедший через рабочую жидкость, увеличивается с течением времени более равномерно. Поэтому зависимость их отношения от времени имеет локальный экстремум в момент времени, приблизительно в 2 раза превышающий время достижения напряжением своего максимума. Для снижения доли электрохимического действия разрядного тока его целесообразно прерывать сразу после наступления указанного момента времени. Зависимость этого отношения от амплитуды напряжения импульсов имеет локальный инфимум при  $U_m=200$  В, поэтому для уменьшения электрохимического загрязнения рабочей жидкости в рассмотренных условиях целесообразно работать при амплитуде напряжения от 40 до 150 В и свыше 300 В.

5. На основе анализа зависимостей основных параметров разрядных импульсов от амплитуды их напряжения и емкости рабочего конденсатора составлена карта электрических режимов плазмозероэрозийной обработки ГТПС лабораторной установки и разработаны рекомендации по управлению гранулометрическим составом плазмозероэрозийных частиц.

Авторы выражают благодарность канд.техн.наук, старшему научному сотруднику Института металлофизики НАН Украины Олиховской Л.А. за предоставленные результаты гранулометрического анализа плазмозероэрозийных частиц  $Ti_{45}Zr_{38}Ni_{17}$ , полученных одним из авторов в жидком аргоне.

1. Лопатько К.Г., Мельничук М.Д. Фізика, синтез та біологічна функціональність нанорозмірних об'єктів. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2013. – 297 с.
2. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Модель выходной цепи генератора разрядных импульсов с плазмозероэрозийной нагрузкой адекватная в широких диапазонах изменений их параметров // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. – С. 69–77.
3. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Нелинейно-параметрическая модель электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред для широкого диапазона изменений приложенного напряжения // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 6. – С. 3–17.
4. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Афтандиянц Е.Г. Применение объемного электроискрового диспергирования для получения седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2009. – № 22. – С. 74-79.
5. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Шевченко Н.И., Ломко Н.А. Разрядно-импульсные системы производства нанокolloидных растворов биологически активных металлов методом объемного электроискрового диспергирования // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2010. – № 26. – С. 152–160.
6. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Кучерявая И.Н., Лопатько К.Г., Афтандиянц Е.Г. Анализ методов повышения эффективности электроэрозийной коагуляции при очистке водных сред // Технічна електродинаміка. Тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2008. – Ч. 2. – С. 120–125.
7. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2003. – No 1. – Pp. 254–255.
8. Berkowitz A.E., Walter J.L. Spark Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine Powders // *Journal of Materials Research.* – 1987. – No 2. – Pp. 277–288.
9. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: influence of processing parameters // *J. Appl. Phys.* – 2004. – Vol. 95. – No 3. – Pp. 823–829.
10. Danilenko N.B., Savel'ev G.G., Yavorovskii N.A., Yurmazova T.A. Chemical reactions in electric pulse dispersion of iron in aqueous solutions // *Russian Journal of Applied Chemistry.* – 2008. – Vol. 81. – No 5. – Pp. 803–809.
11. Hong J.I., Parker F.T., Solomon V.C., Madras P., Smith D.J., Berkowitz A.E. Fabrication of spherical particles with mixed amorphous/crystalline nanostructured cores and insulating oxide shells // *J. Mater. Res.* – 2008. – Vol. 23. – No 6. – Pp. 1758–1763.
12. Hong J.I., Solomon V.C., Smith D.J., Parker F.T., Summers E.M., Berkowitz A.E. One-Step Production of Optimized Fe-Ga Particles by Spark Erosion // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89. – Pp. 142506-1 – 142506-3.
13. Hsu M.S., Meyers M.A., Berkowitz A.E. Synthesis of Nanocrystalline Titanium Carbide by Spark Erosion // *Scripta Metallurgica et Materialia.* – 1995. – Vol. 32. – Pp. 805–808.

14. Kolbasov G.Ya., Ustinov A.I., Shcherba A.A., Perekos A.Ye., Danilov M.O., Vyunova N.V., Zakharchenko S.N., Hossbah G. Application of volumetric electric-spark dispersion for the fabrication of Ti-Zr-Ni hydrogen storage alloys // Journal of Power Sources. – 2005. – Vol. 150. – Pp. 276–281.
15. Nguyen P.K., Jin S., Berkowitz A.E. Mn-Bi particles with high energy density made by spark erosion // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 115. – Pp. 17A756-1 – 17A756-3.
16. Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark erosion: a high production rate method for producing  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  nanoparticles with enhanced thermoelectric performance // Nanotechnology. – 2012. – Vol. 23. – Pp. 415604-1 – 415604-7.
17. Perekos A.E., Chernenko V.A., Bunyaev S.A., Zalutskiy V.P., Ruzhitskaya T.V., Boitsov O.F., Kakazei G.N. Structure and magnetic properties of highly dispersed Ni-Mn-Ga powders prepared by spark-erosion // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 112. – Pp. 093909-1 – 093909-7.
18. Tang Y.J., Parker F.T., Harper H., Berkowitz A.E., Jiang Q., Smith D.J., Brand M., Wang F.  $\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$  Fine Particles for Power Frequency Applications // IEEE Trans. Magn. – 2004. – Vol. 40. – No 4. – Pp. 2002–2004.

УДК 621.3.011.72: 621.3.015.52

### АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ВИХІДНОМУ КОЛІ ГЕНЕРАТОРА РОЗРЯДНИХ ІМПУЛЬСІВ З НЕЛІНІЙНОЮ МОДЕЛЛЮ ПЛАЗМОЕРОЗІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ЗМІНІ ЇХНІХ ПАРАМЕТРІВ У ШИРОКИХ ДІАПАЗОНАХ

**Н.А.Шидловська**, чл.-кор. НАН України, **С.М.Захарченко**, докт.техн.наук, **О.П.Черкаський**  
**Інститут електродинаміки НАН України,**  
**пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,**  
**E-mail: shydlovska@mail.ua, snzakhar@bk.ru, cherska@bk.ru**

*У програмному середовищі Matlab Simulink проведено моделювання перехідних процесів у вихідному колі генератора розрядних імпульсів з нелінійною моделлю плазмоерозійного навантаження, адекватною в широких діапазонах зміни їхніх параметрів. В результаті моделювання отримано та проаналізовано залежності від часу, а також від амплітуди імпульсів напруги і значень реактивних елементів вихідного кола генератора основних параметрів розрядних імпульсів та їхніх похідних. Вперше розраховано залежності від часу та амплітуди імпульсів напруги значення зарядів, що пройшли через плазмові канали і робочу рідину. На основі аналізу залежностей їхнього відношення визначено діапазони зміни напруги і тривалості імпульсів, в яких його питома електрохімічна дія є мінімальною. Складено карту електричних режимів плазмоерозійної обробки гранульованого струмопровідного середовища та розроблено рекомендації з керування гранулометричним складом плазмоерозійних частинок. Бібл. 18, рис. 10, табл. 1.*

**Ключові слова:** нелінійний опір, розрядні імпульси, гранульовані струмопровідні середовища, плазмові канали, моделювання.

### THE ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN OUTPUT CIRCUIT OF THE GENERATOR OF DISCHARGE PULSES WITH NON-LINEAR MODEL OF PLASMA-EROSIVE LOAD AT CHANGE THEIR PARAMETERS IN WIDE RANGES

**N.A. Shydlovska, S.M. Zakharchenko, O.P. Cherkassky**  
**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,**  
**pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**  
**E-mail: shydlovska@mail.ua, [snzakhar@bk.ru](mailto:snzakhar@bk.ru), [cherska@bk.ru](mailto:cherska@bk.ru).**

*In program medium Matlab Simulink modeling of transients in an output circuit of the generator of discharge pulses with non-linear model of plasma-erosive load adequate in wide ranges of change of their parameters is completed. As a result of modeling time dependences and also dependences of basic parameters of discharge pulses and their derivatives from amplitude of voltage of pulses and values of jet devices of an output circuit of the generator are gained and analyzed. Time dependences and dependences from amplitudes of voltage of pulses value of the charges which have transited through plasma channels and a hydraulic medium are calculated for the first time. On the basis of the analysis of dependences of their relations a ranges of change of voltage and duration of pulses in which specific electrochemical activity of current is minimally are found. The card of electrical modes of plasma-erosive processing of the granulated conductive medium and recommendations about control of a grain-size composition of plasma-erosive particles are elaborated. References 18, figures 10, table 1.*

**Key words:** nonlinear resistance, discharge pulses, granular conductive media, plasma channels, modeling.

1. Lopatko K.G., Melnichuk M.D. Physics, synthesis and biological functionality of nanosize objects. – Kyiv: Vydavnychiy tsentr Natsionalnoho Universytetu Bioresursiv i Pryidokorystuvannia Ukrainy, 2013. – 297 p. (Ukr)
2. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.N., Cherkassky A.P. Model of an output circuit of the discharge pulses generator with a plasma-erosive load adequate in wide range of changes of their parameters // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2015. – No 6. – Pp. 69–77. (Rus)
3. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.N., Cherkassky A.P. Nonlinear-parametrical model of electrical resistance of conductive granulated media for a wide range of applied voltage // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2014. – No 6. – Pp. 3–17. (Rus)
4. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Lopatko K.G., Aftandilyants E.G. Application of volume electric spark dispersion for production steady to sedimentation hydrosols of biological active metals // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2009. – No 22. – Pp. 74–79. (Rus)
5. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Lopatko K.G., Shevchenko N.I., Lomko N.A. Discharge-pulsing systems of production of nano-colloidal solutions of biologically active metals by a method of volumetric electric-spark dispersing // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2010. – No 26. – Pp. 152–160. (Rus)
6. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Yatsyuk S.A., Kucheryavaya I.N., Lopatko K.G., Aftandilyants E.G. Analyze of methods of raise of efficiency of electric-erosive coagulation for purification of water media // *Tekhnichna Elektrodynamika*. Tematychnyi vypusk “Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist”. – 2008. – Part 2. – Pp. 120–125. (Rus)
7. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2003. – No 1. – Pp. 254–255.
8. Berkowitz A.E., Walter J.L. Spark Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine Powders // *Journal of Materials Research*. – 1987. – No 2. – Pp. 277–288.
9. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: influence of processing parameters // *J. Appl. Phys.* – 2004. – Vol. 95. – No 3. – Pp. 823–829.
10. Danilenko N.B., Savel'ev G.G., Yavorovskii N.A., Yurmazova T.A. Chemical reactions in electric pulse dispersion of iron in aqueous solutions // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2008. – Vol. 81. – No 5. – Pp. 803–809.
11. Hong J.I., Parker F.T., Solomon V.C., Madras P., Smith D.J., Berkowitz A.E. Fabrication of spherical particles with mixed amorphous/crystalline nanostructured cores and insulating oxide shells // *J. Mater. Res.* – 2008. – Vol. 23. – No 6. – Pp. 1758–1763.
12. Hong J.I., Solomon V.C., Smith D.J., Parker F.T., Summers E.M., Berkowitz A.E. One-Step Production of Optimized Fe-Ga Particles by Spark Erosion // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 89. – Pp. 142506-1 – 142506-3.
13. Hsu M.S., Meyers M.A., Berkowitz A.E. Synthesis of Nanocrystalline Titanium Carbide by Spark Erosion // *Scripta Metallurgica et Materialia*. – 1995. – Vol. 32. – Pp. 805–808.
14. Kolbasov G.Ya., Ustinov A.I., Shcherba A.A., Perekos A.Ye., Danilov M.O., Vyunova N.V., Zakharchenko S.N., Hossbah G. Application of volumetric electric-spark dispersion for the fabrication of Ti-Zr-Ni hydrogen storage alloys // *Journal of Power Sources*. – 2005. – Vol. 150. – Pp. 276–281.
15. Nguyen P.K., Jin S., Berkowitz A.E. Mn-Bi particles with high energy density made by spark erosion // *J. Appl. Phys.* – 2014. – Vol. 115. – Pp. 17A756-1 – 17A756-3.
16. Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark erosion: a high production rate method for producing Bi<sub>0.5</sub>Sb<sub>1.5</sub>Te<sub>3</sub> nanoparticles with enhanced thermoelectric performance // *Nanotechnology*. – 2012. – Vol. 23. – Pp. 415604-1 – 415604-7.
17. Perekos A.E., Chernenko V.A., Bunyaev S.A., Zalutskiy V.P., Ruzhitskaya T.V., Boitsov O.F., Kakazei G.N. Structure and magnetic properties of highly dispersed Ni-Mn-Ga powders prepared by spark-erosion // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 112. – Pp. 093909-1 – 093909-7.
18. Tang Y.J., Parker F.T., Harper H., Berkowitz A.E., Jiang Q., Smith D.J., Brand M., Wang F. Co<sub>50</sub>Fe<sub>50</sub> Fine Particles for Power Frequency Applications // *IEEE Trans. Magn.* – 2004. – Vol. 40. – No 4. – Pp. 2002–2004.

Надійшла 12.06.2015  
Остаточний варіант 30.12.2015