

УДК 539.1.03(621.384.6+533.9.07:533.952)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛЬНОТОЧНОГО ВАКУУМНОГО ПИНЧ-ДИОДА ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ “ГАММА-1”

Н. В. Завьялов, В. С. Гордеев, В. Т. Пунин, А. В. Гришин,  
С. Т. Назаренко, В. С. Павлов, В. А. Деманов, Д. А. Калашников,  
А. В. Козачек, К. В. Страбыкин, С. Ю. Пучагин, М. А. Моисеевских,  
Д. О. Мансуров, Б. П. Миронычев, Р. А. Майоров, В. Л. Майорникова

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607188 Саров, Россия

E-mails: zavyalov@expd.vniief.ru, gordeev@expd.vniief.ru, punin@expd.vniief.ru,  
grishin@expd.vniief.ru, STNazarenko@vniief.ru, VSPavlov@vniief.ru,  
VADemanov@vniief.ru, kalashnikov@expd.vniief.ru, kozachek@expd.vniief.ru,  
strabykin@expd.vniief.ru, Sergey.Puchagin@cern.ch, moiseevskikh@expd.vniief.ru,  
mansurov@expd.vniief.ru, mironychev@expd.vniief.ru, mayorov@expd.vniief.ru,  
majornikova@expd.vniief.ru

Разрабатывается четырехмодульная электрофизическая установка “Гамма-4”, предназначенная для генерации мощных импульсов тормозного излучения. Одним из основных режимов работы установки является режим работы каждого модуля на свой автономный вакуумный диод. Определены электрические характеристики сильноточного вакуумного пинч-диоода типового модуля установки “Гамма-4” — импульсного ускорителя электронов “Гамма-1”. Показано, что при изменении импеданса диода в диапазоне  $1,3 \div 4,0$  Ом могут быть реализованы режимы работы, в которых формируются импульсы тормозного излучения с граничной энергией квантов от 0,9 до 2,0 МэВ.

**Ключевые слова:** импульсный ускоритель электронов, сильноточный пинч-диод, КПД ускорителя электронов, парapotенциальная модель, флюксметр.

**Введение.** Создаваемая четырехмодульная электрофизическая установка “Гамма-4”, включающая четыре типовых модуля, предназначена для проведения исследований в области радиационной физики. Каждый модуль представляет собой сильноточный импульсный ускоритель электронов, формирующая система которого аналогична формирующей системе импульсного ускорителя электронов “Гамма-1” [1]. Выходное сопротивление двойной ступенчатой формирующей линии (ДСФЛ) ускорителя “Гамма-1” составляет 2,9 Ом. Для обеспечения максимального выхода гамма-квантов с энергией до 100 кэВ в спектре излучения граничная энергия электронов не должна превышать 2 МэВ [2]. Выходной узел уско-

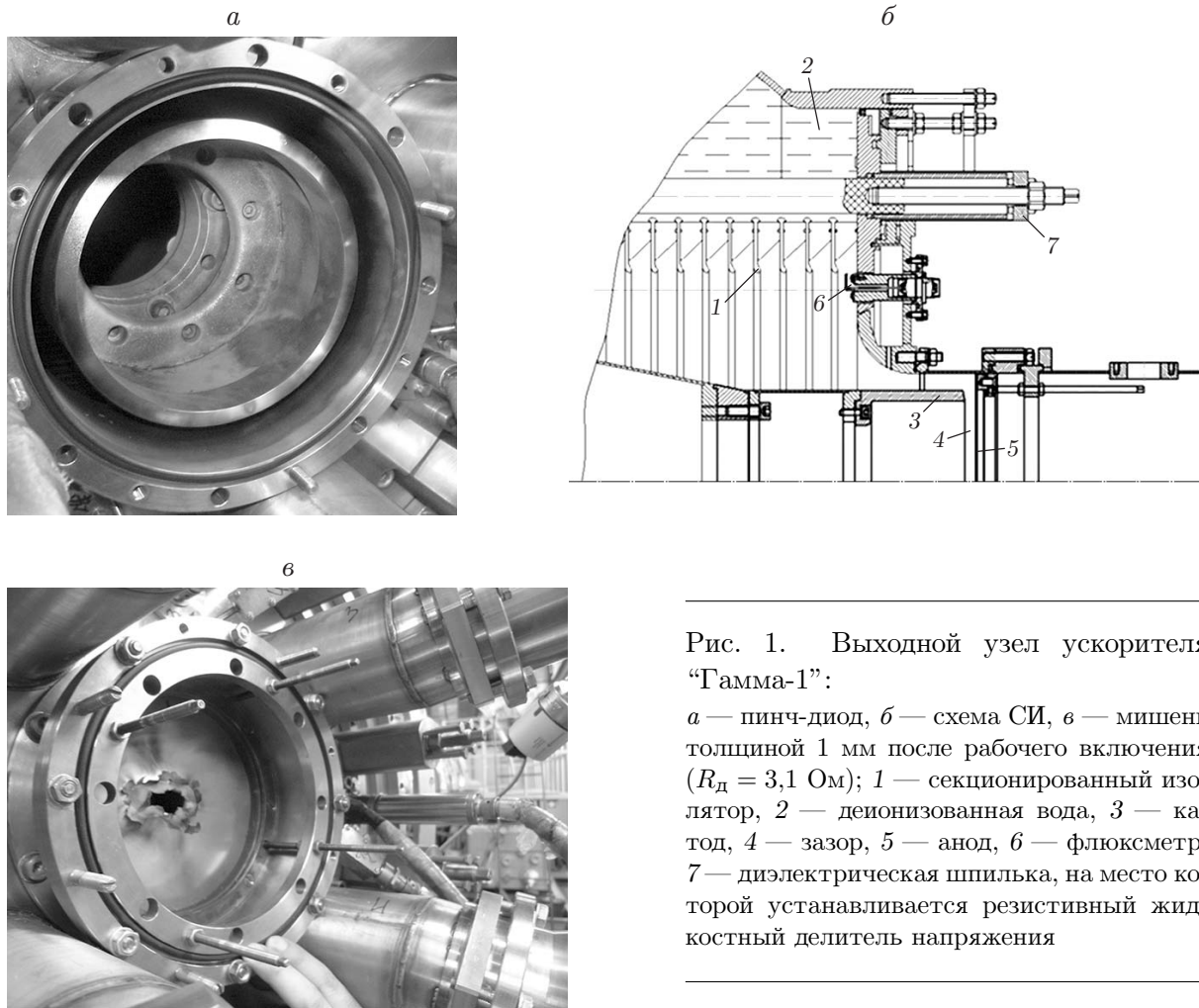


Рис. 1. Выходной узел ускорителя “Гамма-1”:

*a* — пинч-диод, *б* — схема СИ, *в* — мишень толщиной 1 мм после рабочего включения ( $R_{д} = 3,1 \text{ Ом}$ ); 1 — секционированный изолятор, 2 — деионизованная вода, 3 — катод, 4 — зазор, 5 — анод, 6 — флюксометр, 7 — диэлектрическая шпилька, на место которой устанавливается резистивный жидкостный делитель напряжения

рителя “Гамма-1” представляет собой низкоимпедансный сильноточный вакуумный пинч-диод, образованный кольцевым катодом с выемкой вблизи оси катода для предотвращения преждевременного замыкания зазора между анодом и катодом плазмой. На рис. 1, *a, б* представлены фотография диода и схема узла секционированного изолятора (СИ), на рис. 1, *в* — фотография мишени после рабочего включения.

Известно, что в вакуумном сильноточном пинч-диоде движение электронов может быть описано парapotенциальной моделью, следовательно,

$$I = 8,5\gamma \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) \frac{r}{d_{eff}}, \tag{1}$$

где  $I$  — ток в диоде, кА;  $r$  — радиус катода, мм;  $d_{eff}$  — эффективный размер зазора в диоде, мм;  $\gamma = 1 + eU/(mc^2)$  — релятивистский фактор;  $U$  — напряжение на диоде, В;  $mc^2$  — энергия покоя электрона, Дж;  $e$  — заряд электрона, Кл.

Импеданс диода  $R_{д}$  (при максимальном значении импульса мощности пучка) можно вычислить по формуле [2]

$$R_{д} = \frac{U}{I} = \frac{mc^2(\gamma - 1)}{eI} = \varphi(\gamma) \frac{d_{eff}}{r}. \tag{2}$$

В диапазоне напряжений на диоде  $0,5 \text{ МВ} \leq U \leq 2,0 \text{ МВ}$  функция  $\varphi(\gamma)$  слабо зависит от  $U$

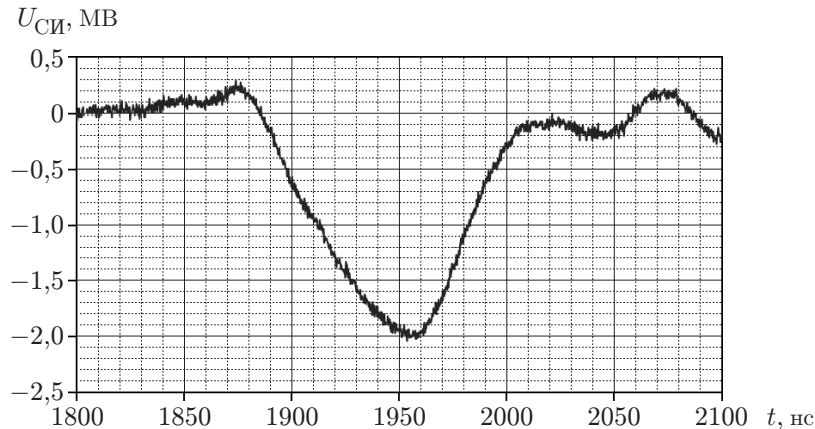


Рис. 2. Импульс напряжения на СИ

и изменяется в диапазоне  $21 \div 23$  Ом. Таким образом, импеданс описанного выше диода зависит только от эффективного размера зазора  $d_{eff}$  между анодом и катодом.

Экспериментальные исследования указанного пинч-диода проведены на ускорителе электронов “Гамма-1” с системой передачи энергии от типового модуля установки “Гамма-4”. Импеданс диода регулировался путем изменения размера зазора между кромкой катода и мишенью в диапазоне  $4 \div 14$  мм.

**1. Экспериментальные исследования.** Принцип действия формирующей системы ускорителя “Гамма-1” и системы передачи энергии от типового модуля установки “Гамма-4” подробно описан в [1, 3] соответственно. В серии рабочих включений зарядное напряжение ДСФЛ составляло 0,9 МВ, что соответствует запасаемой энергии в ДСФЛ  $\approx 90$  кДж. Запасенная энергия в двух генераторах Аркадьева — Маркса составляет  $\approx 115$  кДж. Предымпульсные разрядники работали в режиме включения в конце первой положительной полуволны напряжения, сформированной ДСФЛ.

СИ присоединялся к водяной коаксиальной передающей линии с волновым сопротивлением 2,9 Ом. На рис. 2 показан импульс напряжения, измеренный с помощью резистивного жидкостного делителя напряжения [4], установленного вдоль СИ в воде. При всех рабочих включениях амплитуда импульса напряжения составляла 2,0 МВ, амплитуда импульса тока, измеренного с помощью токового шунта [4], — 650 кА, длительность импульса на полувысоте — 70 нс с погрешностью измерений 10 %.

При всех выполненных включениях ускорителя диаметр эмитирующей кромки катода был одним и тем же. В качестве анода использовались мишени из нержавеющей стали.

После каждого рабочего включения ускорителя по результатам обработки осциллограмм вычислялись:

— запасенная в ДСФЛ электрическая энергия  $W_{ДСФЛ}$  в джоулях:

$$W_{ДСФЛ} = CU_0^2/2 \quad (3)$$

( $C$  — электрическая емкость ДСФЛ, Ф;  $U_0$  — напряжение зарядки ДСФЛ, В);

— мощность  $P_{СИ}$  в ваттах и энергия  $W_{СИ}$  в узле СИ в джоулях:

$$P_{СИ} = \left( U_{СИ} - L_{СИ} \frac{dI_{\Phi}}{dt} \right) \int \frac{dI_{\Phi}}{dt} dt; \quad (4)$$

$$W_{СИ} = \int P_{СИ} dt \quad (5)$$

( $dI_{\Phi}/dt$  — производная тока, измеренная с помощью флюксометров на выходе СИ, А/с);

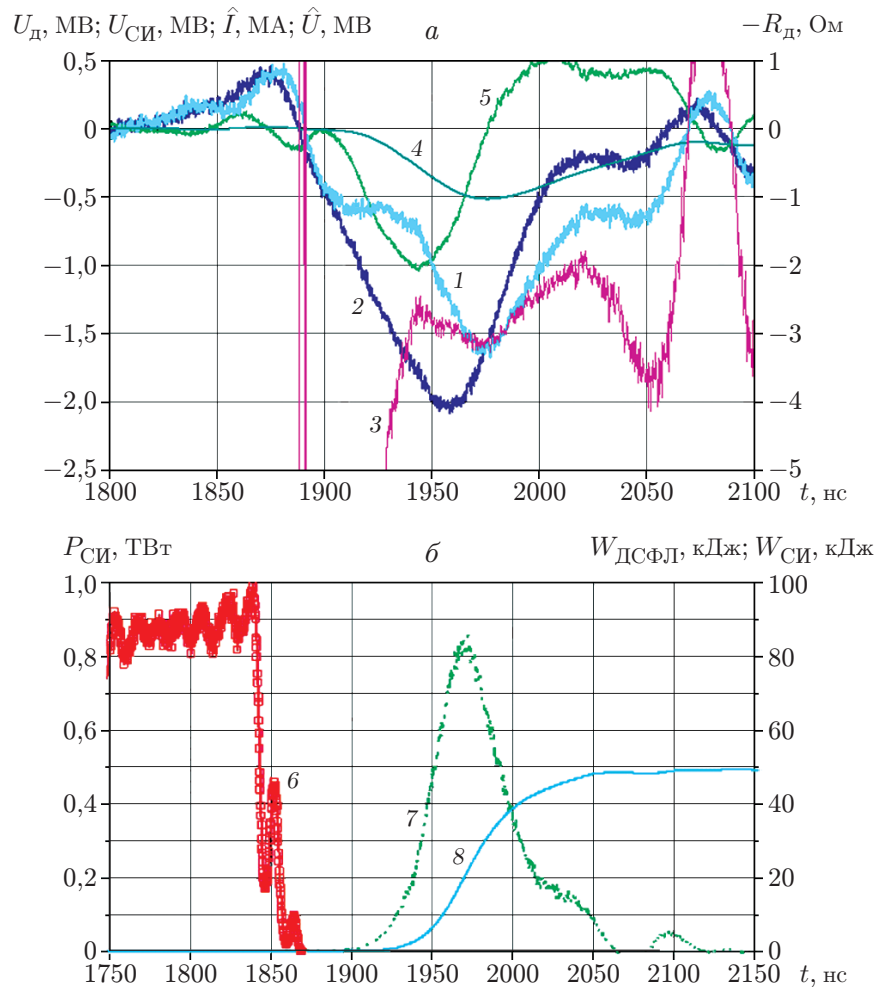


Рис. 3. Зависимости электрических (а) и энергетических (б) параметров диода от времени при одном из включений ( $R_d = 3,1 \text{ Ом}$ ):  
 1 —  $U_d$ , 2 —  $U_{СИ}$ , 3 —  $R_d$ , 4 —  $\hat{I} = \int \frac{dI_\Phi}{dt}$ , 5 —  $\hat{U} = L_{СИ} \frac{dI_\Phi}{dt}$ , 6 —  $W_{ДСФЛ}$ , 7 —  $P_{СИ}$ ,  
 8 —  $W_{СИ}$

- напряжение  $U_{СИ}$  с резистивного делителя напряжения, установленного вдоль СИ в воде, в вольтах;
- расчетная индуктивность СИ  $L_{СИ}$  в генри;
- КПД передачи энергии от ДСФЛ до диода:

$$\eta = \frac{W_{СИ}}{W_{ДСФЛ}} \cdot 100 \%; \tag{6}$$

- напряжение на диоде  $U_d$  в вольтах:

$$U_d = U_{СИ} - L_{СИ} \frac{dI_\Phi}{dt}. \tag{7}$$

На рис. 3 представлены рассчитанные по формулам (3)–(7) зависимости электрических параметров диода от времени при одном из включений.

**2. Результаты исследования.** Для каждого размера зазора в диоде выполнялось несколько рабочих включений ускорителя. В диоде устанавливались зазоры, имеющие размеры в диапазоне  $4 \div 14 \text{ мм}$ . Зависимость рассчитанного по формуле (7) напряжения на

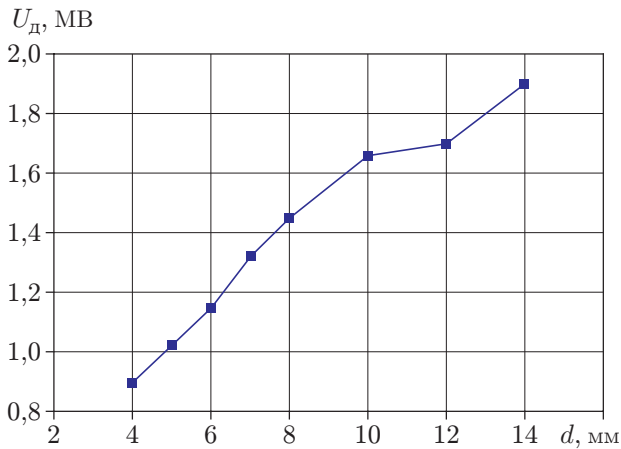


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость напряжения на диоде от размера зазора

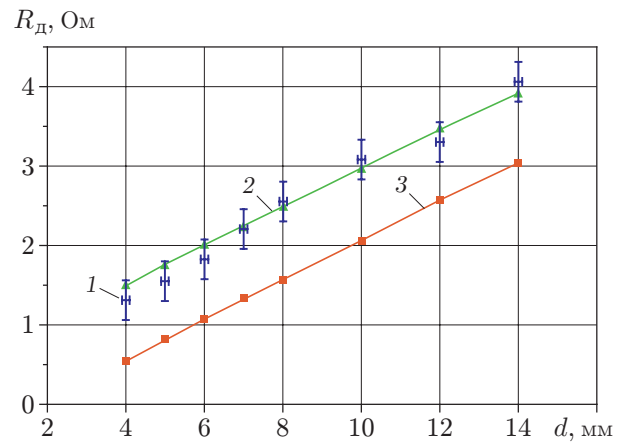


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость импеданса диода от размера зазора:

1 — экспериментальные данные, 2 — результаты расчета с учетом поправки, 3 — результаты расчета без учета поправки

диоде  $U_d$  от размера зазора представлена на рис. 4. В проведенных включениях максимальное значение напряжения на диоде составило  $\approx 2,0$  МВ, максимальный ток электронного пучка  $\approx 700$  кА.

Эффективный размер зазора  $d_{eff}$  (см. (2)) вычислялся по формуле

$$d_{eff} = d - v_p t, \quad (8)$$

где  $d$  — размер зазора между катодом и мишенью, мм;  $v_p = (2 \div 10) \cdot 10^7$  мм/с — средняя скорость распространения плазмы в диоде [2, 5];  $t$  — длительность импульса мощности, с.

Выбирая значения  $v_p = 5 \cdot 10^7$  мм/с,  $t = 40$  нс, из формул (2), (8) получаем зависимость импеданса диода  $R_d$  от размера зазора между катодом и мишенью  $d$ .

Рассчитанный импеданс диода для всех восьми размеров зазора меньше измеренного значения импеданса на  $\approx 1$  Ом. Если в формулу (8) для расчета  $d_{eff}$  ввести поправку [5]:

$$d_{eff} = d - v_p t + 3,5, \quad (9)$$

то по формуле (2) можно вычислить зависимость импеданса диода от размера зазора, которая достаточно хорошо согласуется с экспериментальной зависимостью. Рассчитанные таким образом зависимости импеданса диода от размера зазора представлены на рис. 5.

Следует отметить, что в отличие от работы [5], в которой дополнительное слагаемое в формуле для вычисления  $d_{eff}$  равно  $-1,5$ , в данной работе оно равно  $3,5$ . Это можно объяснить влиянием различных факторов. Во-первых, в [5] экспериментальные исследования диода проводились в диапазонах значений напряжения на диоде  $0,4 \div 0,8$  МВ и тока  $100 \div 500$  кА. В данной работе такие исследования выполнялись при напряжении на диоде  $0,9 \div 2,0$  МВ и токе диода  $450 \div 750$  кА. Во-вторых, на значение импеданса может оказывать влияние положительный предимпульс напряжения в диоде длительностью  $\approx 40$  нс с амплитудой  $0,4 \div 0,5$  МВ. В-третьих, на результаты могут влиять погрешность калибровки датчиков тока и напряжения и неидеальность парапотенциальной модели при ее использовании для описания режима работы пинч-диола.

На рис. 6 представлена экспериментальная зависимость КПД передачи энергии от ДСФЛ к диоду  $\eta$  от размера зазора. Для типового модуля установки “Гамма-4” значение  $\eta$

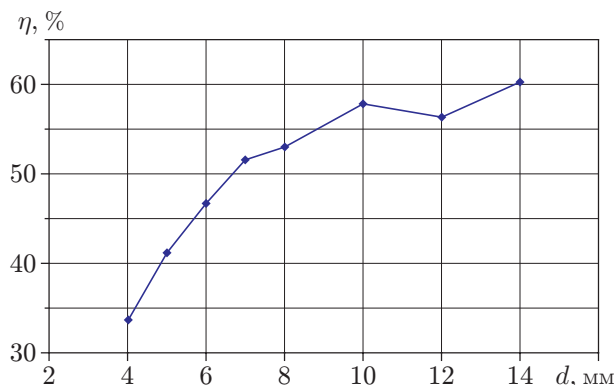


Рис. 6. Зависимость КПД передачи энергии от ДСФЛ к диоду от размера зазора

составило  $\approx 60\%$  (КПД передачи энергии от генераторов Аркадьева — Маркса к диоду  $\approx 50\%$ ). В большинстве случаев для таких ускорителей электронов  $\eta = 20 \div 30\%$  [6, 7]. Энергия электронного пучка в диоде  $W_{\text{СИ}}$  изменялась в диапазоне  $30 \div 50$  кДж.

Выходное сопротивление ДСФЛ и волновое сопротивление водяной передающей коаксиальной линии составляют  $2,9$  Ом. При импедансе диода  $\approx 1,5$  Ом значение  $\eta$  уменьшается до  $30 \div 35\%$ .

**Заключение.** На ускорителе “Гамма-1” проведены экспериментальные исследования электрических характеристик низкоимпедансного сильноточного вакуумного пинч-диода. Показано, что экспериментальные данные об импедансе диода хорошо согласуются с данными, полученными с использованием парapotенциальной теории и с учетом поправки к формуле для вычисления размера зазора.

КПД передачи энергии от ДСФЛ к диоду, измеренный при импедансе диода, близком к волновому сопротивлению  $2,9$  Ом, составляет  $55 \div 60\%$ . При импедансе диода  $\approx 1,5$  Ом значение  $\eta$  уменьшается до  $30 \div 35\%$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф. и др. Результаты экспериментальных исследований некоторых режимов работы сильноточного импульсного ускорителя электронов “Гамма-1” // Сб. докл. Междунар. конф. “12-е Харитоновские научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии”, Саров, 19–23 апр. 2010 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2010. С. 49–54.
2. Петин В. К., Ратахин Н. А. Предельные возможности генераторов СЖРИ на базе сильноточных ускорителей электронов // Сб. докл. 9-й межотраслевой конф. по радиационной стойкости, Снежинск, 12–15 окт. 2010 г. Снежинск: Всерос. науч.-исслед. ин-т техн. физики, 2011. Т. 1. С. 19–26.
3. Гордеев В. С., Басманов В. Ф., Гришин А. В. и др. Результаты экспериментальных исследований системы передачи энергии типового модуля установки “Гамма” // Сб. докл. Междунар. конф. “14-е Харитоновские научные чтения: Мощная импульсная электрофизика”, 12–16 марта 2012 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2013. С. 112–116.
4. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Гришин А. В. Система регистрации электрических параметров сильноточного импульсного ускорителя электронов “Гамма-1” // Сб. докл. Междунар. конф. “12-е Харитоновские научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии”, Саров, 19–23 апр. 2010 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2010. С. 112–118.

5. **Cooperstein G., Condon J. J.** Impedance characteristics of diodes operation in the self-pinch mode // J. Appl. Phys. 1975. V. 46, N 4. P. 1535–1538.
6. **Bloomquist D. D., Stinnett R. W., McDaniel D. H., et al.** Saturn, a large area X-ray simulation accelerator // Proc. of the 6th IEEE pulsed power conf., Arlington, June 29 — July 1, 1987. N. Y.: IEEE, 1987. P. 310.
7. **Savage M. E., LeChien K. R., Lopez M. R., et al.** Status of the Z pulsed power driver // Proc. of the 18th Intern. pulsed power conf., Chicago, June 19–23, 2011. S. l.: Omnipress, 2011. P. 983–990.

*Поступила в редакцию 22/XII 2014 г.*

---