

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО ДИОДА ЧАСТОТНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Егоров И.С.

*ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: egoris@tpu.ru*

Показаны возможности применения результатов моделирования электрической цепи для оптимизации режимов работы ускорителя электронов субмикросекундной длительности АСТРА-М. Рассмотрен процесс составления схемы замещения цепи, построения эквивалентной цепи в среде моделирования и проверки корректности действующей модели в диапазоне моделируемых параметров. Модель импульсного электронного ускорителя составлена из двух укрупнённых блоков: генератора импульсов ускоряющего напряжения и электронного диода, причём режим работы первого блока определяется переменными параметрами второго. Совпадение экспериментальных и полученных в результате моделирования данных позволили использовать модель для анализа режимов работы ускорителя, не доступных экспериментально. Анализ данных, полученных в результате моделирования, позволил определить параметры электронного диода, обеспечивающие наибольшую эффективность работы ускорителя в двух режимах: генерации электронного пучка в вакууме и выпуска его в атмосферу. При найденных оптимальных параметрах электронного диода ускоритель АСТРА-М был испытан и нашёл применение в качестве импульсного источника ионизирующего излучения.

Ключевые слова: частотный ускоритель электронов, электронный диод, генератор высоковольтных импульсов.

## OPTIMIZATION OF THE ELECTRON DIODE PARAMETERS FOR A HIGH REPETITION RATE PULSED ELECTRON ACCELERATOR

Egorov I.S.

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, (634050, Lenin str., 30), e-mail: egoris@tpu.ru*

We have developed an electrical circuit model for simulation of parameters of the ASTRA-M pulsed electron accelerator with sub-microsecond pulse duration for optimization its operation. The paper describes a substitution circuit of the accelerator, development of the equivalent circuit in simulation environment and comparison of the simulation results with experiment for a range of simulated parameters. The simulation model of the accelerator consists of two enlarged units: a pulsed generator of accelerating voltage and electron diode. The operation mode of the first unit is determined by the variable parameters of the second unit. Good agreement between experimental simulation results allowed us using this model to analyze the modes of accelerator operation which are not feasible experimentally. Having analyses the simulation result we found optimal parameters of the electron diode which provide the highest efficiency of accelerator operation in two modes: electron beam generation in vacuum and ejection of the beam into the atmosphere. Optimal parameters of the diode found though simulation were used for real application of the ASTRA-M accelerator as a source of ionizing radiation.

Keywords: high repetition rate pulsed electron accelerator, vacuum electron diode, high voltage pulse generator.

### Введение

Расширение возможностей практического применения электронных ускорителей в промышленности [5, 8] и народном хозяйстве [10] стимулирует развитие ускорительной техники в направлении создания оборудования, пригодного для промышленной эксплуатации. При проектировании новых образцов оборудования и модернизации старых, активно применяются средства систем автоматизированного проектирования (САПР) и различных сред моделирования физических процессов. Модели позволяют исследовать режимы работы создаваемого оборудования до проведения натурных исследований в

диапазоне условий, зачастую превышающем возможности созданного оборудования. При этом широко распространённые программы моделирования электрических процессов базируются на применении базовых электротехнических законов, что позволяет получать одинаковые результаты моделирования в любой из них с поправкой на точность вычисления. Такой подход существенно снижает материальные и временные затраты на разработку оборудования, однако главным преимуществом является возможность гибкой коррекции готовой модели при изменении условий решаемой задачи. Применяя к импульсным ускорителям электронов, такими задачами будут являться: варьирование максимальной кинетической энергии электронов в пучке, мощность, развиваемая в пучке, энергия, переносимая пучком электронов за импульс, частота следования импульсов тока пучка и, соответственно, средняя мощность пучка. Перечисленные выше параметры должны быть доступны для оценки по результатам моделирования. Одним из самых важных вопросов при использовании результатов моделирования является оценка корректности применяемой модели. Любая проверка корректности модели, в конечном итоге, заключается в сравнении результатов моделирования с реальными показателями, полученными эмпирическим путём. Данная статья посвящена разработке модели электрической цепи импульсного ускорителя электронов серии АСТРА, проверке её корректности в заданном диапазоне моделируемых параметров и её применению для определения параметров диода, соответствующих наибольшей эффективности работы ускорителя.

### **Материалы и методы исследования**

Основой для создания модели импульсного электронного ускорителя АСТРА является схема замещения ускорителя, описанная в [4]. Схема базируется на применении повышающего импульсного трансформатора, нагруженного непосредственно на электронный диод. Функционально схему можно разделить на генератор высоковольтных импульсов с постоянными характеристиками, нагруженный на электронный диод, параметры которого будут определять режим работы генератора. Данное разделение позволяет рассматривать отдельно модели для указанных функциональных блоков для проверки их корректности.

Моделируемая схема замещения (рис. 1) была дополнена ёмкостями элементов конструкции ускорителя. Для оценки значений ёмкостей элементов, ввиду малой их величины для корректного инструментального измерения, был использован расчёт в программе моделирования полей ELCUT 5.5 Профессиональная версия. Оценка конструктивных индуктивностей в цепи генерации импульсов ускоряющего напряжения произведена, исходя из геометрических размеров токопроводов с учётом проводимости материала и поверхностного эффекта [3, 6]. Полученные значения элементов проверены при сравнении результатов моделирования и экспериментальной реализации режима короткого замыкания

генератора высоковольтных импульсов, во время которого, роль нагрузки генератора выполняет низкоиндуктивный шунт. По падению напряжения на сопротивлении низкоиндуктивного шунта оценивается ток, протекающий в разрядной цепи генератора.

Для упрощения вида моделируемой схемы замещения электрической цепи генератора, схема была приведена к единому значению напряжения [1] с учётом Т-образной схемы замещения импульсного трансформатора [7].

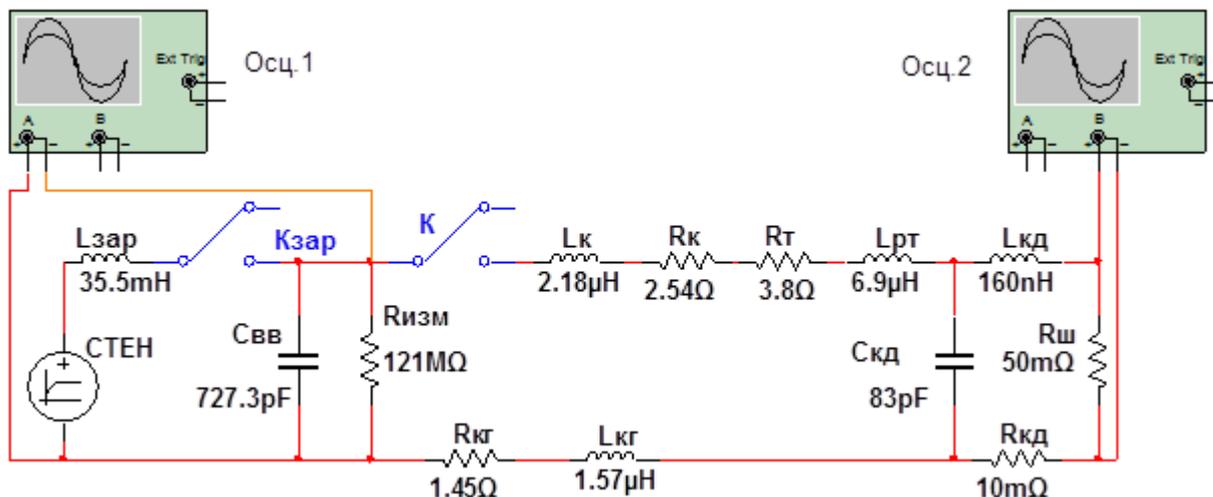


Рисунок 1. Изображение модели электрической цепи ускорителя в режиме короткого замыкания

$C_{ВВ}$  – высоковольтный ёмкостный накопитель;  $R_{ИЗМ}$  – сопротивление высоковольтного плеча омического делителя напряжения;  $L_{КГ}$  – индуктивность контура разряда высоковольтного ёмкостного накопителя;  $R_{КГ}$  – сопротивление контура разряда ёмкостного накопителя;  $K$  – высоковольтный коммутатор;  $R_{К}$  – сопротивление токопроводящего канала коммутатора;  $T$  – высоковольтный импульсный трансформатор;  $L_{РТ}$  – индуктивность рассеяния трансформатора;  $R_{ОТ}$  – сопротивление обмоток трансформатора;  $C_{КГ}$  – конструктивная ёмкость генератора;  $L_{КД}$  – индуктивность электронного диода;  $C_{КД}$  – конструктивная ёмкость диода;  $R_{Ш}$  – сопротивление низкоиндуктивного шунта.

Следует отметить, что в модели электрической цепи измерительные приборы подключаются в точках, соответствующих точкам подключения реального диагностического оборудования [4].

### Полученные результаты и их обсуждение

Для оценки корректности модели электрической цепи, показанной на рис. 1, был проведён анализ данных, полученных в результате моделирования работы схемы с разными значениями нагрузки генератора, включенными последовательно к низкоиндуктивному шунту. Аналогичные экспериментальные исследования были проведены на действующей установке. Кривые напряжения на нагрузке одинаковым сопротивлением для модели и действующей электрической цепи представлены на рис. 2. Совпадение точек кривых позволяет говорить о корректности функционирования модели. Сравнение данных,

полученных в результате анализа кривых мощности для импедансов нагрузки вплоть до  $R_H=750$  Ом, позволило построить зависимости энергии, выделяемой в диоде (рис. 3).

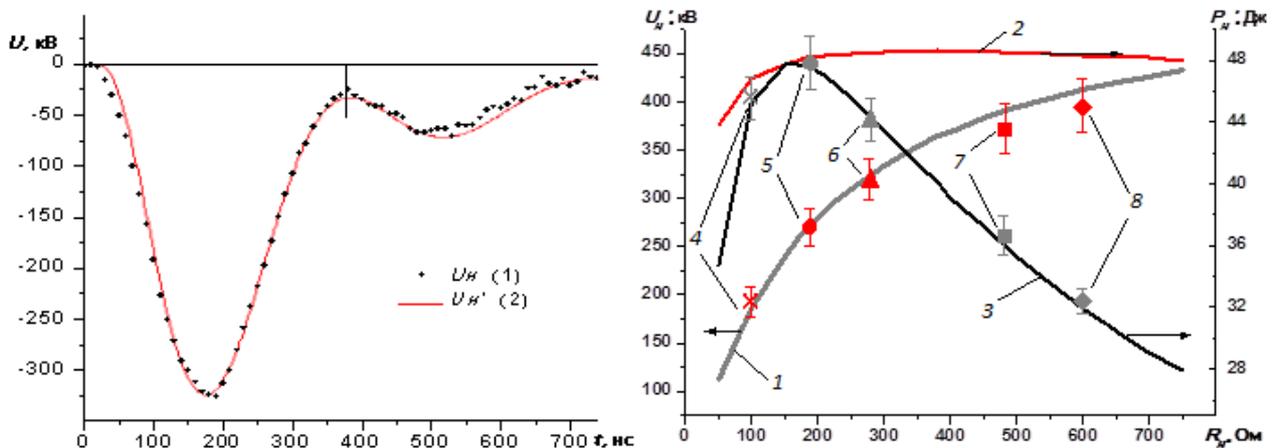


Рисунок 2 (слева). Смоделированный импульс напряжения  $U_H'$  (2) на нагрузке  $R_H=280$  Ом в сравнении с полученным экспериментальным путём  $U_H$  (1)

Рисунок 3 (справа). Зависимость амплитуды импульса напряжения и энергии, выделяемой в нагрузке от её сопротивления. 1 – смоделированная кривая амплитуды напряжения на нагрузке; 2 – кривая энергии, выделенной в нагрузке; 3 – кривая энергии, выделенной в нагрузке за длительность первого импульса напряжения; 4, 5, 6, 7, 8 – экспериментальные значения амплитуды и энергии выделенной в нагрузке за длительность первого импульса напряжения для  $R_H=100$  Ом,  $R_H=190$  Ом,  $R_H=280$  Ом,  $R_H=480$  Ом и  $R_H=600$  Ом соответственно.

Следует отметить, что применяемая схема генерации импульсов напряжения (рис. 1) позволяет сформировать на нагрузке сигнал с несколькими, ярко выраженными экстремумами (рис. 2). Учитывая, что электрическая прочность применяемой изоляции высоковольтной части ускорителя зависит как от амплитуды, так и от длительности воздействия импульса напряжения, наличие пульсаций значимой амплитуды рассматривается в отрицательном аспекте. В таком случае, целесообразно осуществлять передачу максимального количества энергии электронам пучка за длительность первого – основного импульса напряжения, граница которого отмечена на рис 2. Кривая 3 на рис. 3 соответствует вычисленному значению энергии, переданной электронам пучка за время длительности основного импульса напряжения. Максимальная эффективность передачи достигается при значениях импеданса нагрузки близких к значению импеданса выходной цепи генератора  $\approx 130$  Ом, однако, амплитуда прикладываемого импульса напряжения при этом составляет  $\approx 260$  кВ, что соответствует высоким потерям электронного пучка в разделительной фольге при инжекции его в атмосферу [2]. Анализ работы ускорителя с диодом на основе композиционного катода [2] показал возможность увеличения амплитуды генерируемого импульса напряжения при наличии задержки протекания эмиссионного тока. Оценка возможностей применения данного способа для увеличения амплитуды импульса высокого напряжения и, как следствие, увеличения эффективности инжекции электронного

пучка в атмосферу, может быть проведена при использовании модели генератора высоковольтных импульсов (рис. 1). Для этого в модель схемы введена нагрузка, характер изменения импеданса которой (рис. 4-б) соответствует характеру изменения импеданса диода с композиционным катодом (рис. 4-а).

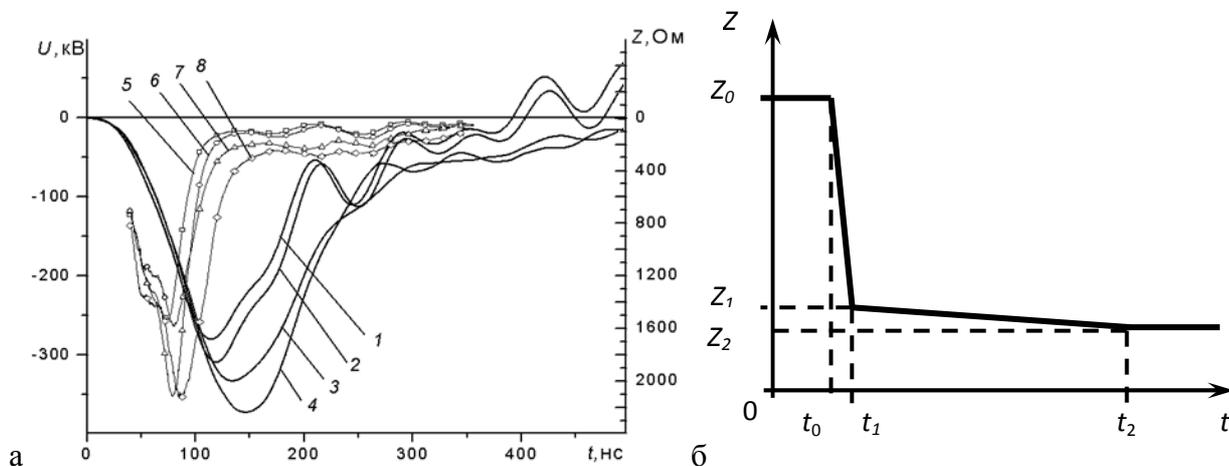


Рисунок 4. Напряжение на ускоряющем промежутке (1, 2, 3, 4) и импеданс диодов (5, 6, 7, 8) с композиционным ( $\text{Cu}+30\text{Al}_2\text{O}_3$ ) катодом (а) при величине ускоряющего промежутка  $d=16$  мм (1, 5),  $d=20$  мм (2, 6),  $d=34$  мм (3, 6),  $d=43$  мм (4, 7), моделируемый импеданс диода (б)

В период отсутствия заметной величины эмиссионного тока поведение диода характеризуется некоторым сопротивлением холостого хода  $Z_0$  до момента времени  $t_0$  (рис. 4-б), значение которого определялось экспериментально и зависело как от величины катод-анодного зазора  $d$ , так и от свойств катода (рис. 4-а). Скорость нарастания тока при практически неизменном значении ускоряющего напряжения в период времени от  $t_0$  до  $t_1$  может определяться двумя факторами: скоростью формирования сплошной плазменной поверхности катода и индуктивностью разрядной цепи генератора. Момент времени  $t_1$  соответствует моменту формирования сплошной плазменной поверхности, и характер протекания электронного тока на ускоряющем промежутке до момента времени  $t_2$  описывается законом «степени  $3/2$ ».

Варьирование параметров диода, указанных на рис. 4-б, в определённом экспериментальном диапазоне величин [2], позволило смоделировать кривые изменения напряжения и тока в диоде и на их основе получить значения энергии переданной электронам пучка. Критерием оценки эффективности передачи энергии  $\eta_v$  выступает отношение найденного значения переданной энергии к энергии, запасаемой в ёмкостном накопителе  $C_{\text{ВВ}}$ . (рис. 5-а).

Поведение кривых на рис. 5-а носит сложный характер. Следует отметить, что эффективность передачи энергии  $\eta_v$  возрастает до момента достижения  $t_1 \approx 125$  нс, что фактически соответствует максимуму напряжения, развиваемого на диоде (рис. 4-а). Амплитудное значение напряжения зависит от величины параметра  $Z_0$ . При этом на участке 1 рис. 5-а величина  $Z_0$  слабо влияет на значение эффективности. Данное обстоятельство

справедливо для всех значений  $Z_1$  в диапазоне параметров моделирования, однако большие значения  $Z_1$  соответствуют большим значениям эффективности  $\eta_v$ .

При инжекции пучка электронов в атмосферу, потери в фольге выпускного окна ускорителя обратно пропорциональны кинетической энергии электронов пучка, а, значит, и амплитуде прикладываемого импульса напряжения. Исходя из этого, можно утверждать, что из двух режимов работы ускорителя с одинаковой эффективностью генерации пучка в вакууме  $\eta_v$ , для инжекции пучка в атмосферу, наиболее предпочтителен режим с большим значением напряжения, развиваемого на диоде.

Таким образом, эффективность генерации и выпуска электронного пучка в атмосферу  $\eta_a$  будет определяться как эффективностью генерации электронного пучка в диоде (рис. 5-а), так и уровнем напряжения, зависящего от импеданса диода (рис. 5-б).

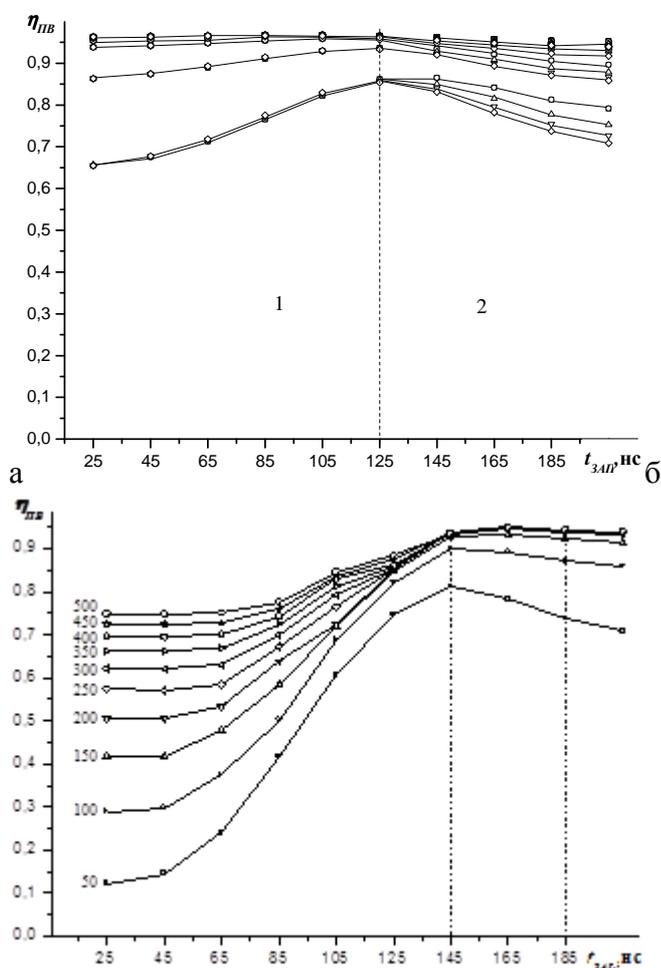


Рисунок 5. Зависимость от времени запаздывания эмиссионного тока эффективности генерации электронного пучка в вакууме (а) и при выпуске электронного пучка в атмосферу (б)

На рисунке (б) приведены кривые для  $Z_0 = 2200$  Ом, цифрами указан импеданс диода  $Z_1$  в Ом для каждой кривой.

Анализ кривых (рис. 5-б) позволяет утверждать, что при  $Z_0 = 2200$  Ом максимальные показатели эффективности генерации и выпуска пучка электронов в атмосферу будут

достигаться при запаздывании электронного тока  $t_1$  в диапазоне от 145 до 185 нс при максимуме  $t_1=165$  нс. Это объясняется сочетанием высоких значений эффективности генерации электронного пучка в диоде и снижением потерь в разделительной фольге выпускного окна при достижении высоких значений напряжения на диоде, а значит и кинетической энергии электронов.

### **Заключение**

Созданная расчётная модель генератора высоковольтных импульсов корректно описывает режимы работы реальной установки в диапазоне моделируемых параметров. Модель может быть применена в процессе проектирования ускорителей данного типа и изменений, вносимых в функциональную схему ускорителя. В данной статье приведены результаты моделирования работы генератора высоковольтных импульсов ускорителя на нелинейную нагрузку с импедансом, характерным для диодов, с высоким значением запаздывания эмиссионного тока. Анализ результатов позволил определить параметры диода, при которых достигается наибольшее значение эффективности генерации электронного пучка в вакууме и инжекции его в атмосферу. Полученные результаты были использованы при организации частотной работы ускорителя [9] в процессе решения прикладных задач [10].

*Автор выражает благодарность заведующему лабораторией № 1 ИФВТ ТПУ, профессору, д.т.н. Ремнёву Г.Е. за участие в обсуждении материалов статьи.*

### **Список литературы**

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – 9-е изд. – М.: Высшая школа, 1996.
2. Вагнер М.И., Егоров И.С., Кайканов М.И., Прибытков Г.А., Ремнёв Г.Е., Савицкий А.П., Степанов А.В. Исследование характеристик планарного диода с композиционным катодом // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 11/3. – С. 80-85.
3. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с: ил.
4. Егоров И.С., Кайканов М.И., Луконин Е.И., Ремнёв Г.Е., Степанов А.В. Частотно-импульсный электронный ускоритель «Астра» // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – №. 5. – С. 81-84.
5. Кайканов М.И., Ремнев Г.Е., Юдина Н.В., Егоров И.С., Лоскутова Ю.В. Исследование реологических свойств нефти при облучении импульсным сильноточным электронным пучком // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 6/2. – С. 37-42.
6. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. Первое изд. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.

7. Матханов П. Н., Гоголицын Л. З. Расчёт импульсных трансформаторов. – Энергия, 1980.
8. Пушкарев А.И., Ремнев Г.Е., Пономарев Д.В., Ежов В.В., Гончаров Д.В. Использование импульсных электронных пучков в плазмохимии // Известия ТПУ. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 103-108.
9. Egorov I., Esipov V., Remnev G., Kaikanov M., Lukonin E., and Poloskov A. A high-repetition rate pulsed electron accelerator // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2013. V. 20. No. 4. P. 1334-1339.
10. Treatment of Industrial and Household Waste Water with the Pulse Electron Accelerator-Based Setup / I.S. Egorov, M.I. Kaikanov, D.Y. Kolokolov et.al. // Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 10/3. – С. 61-64.

**Рецензенты:**

Лопатин В.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией № 5 Института физики высоких технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г.Томск.

Пушкарёв А.И., д.ф.-м.н., профессор. Институт физики высоких технологий, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г.Томск.