

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕДИНОЙ ДИОДНОЙ НАГРУЗКИ УСТАНОВКИ «ГАММА-4»

NUMERICAL SIMULATION OF THE COMMON VACUUM DIODE LOAD OF «GAMMA-4» FACILITY

С. Ю. Пучагин, В. С. Гордеев, К. В. Страбыкин, Е. А. Чернышев, Р. П. Трунцева

S. Yu. Puchagin, V. S. Gordeev, K. V. Strabykin, E. A. Chernyshev, R. P. Truntseva

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Проведена расчетная оптимизация конфигурации единой диодной нагрузки электрофизической установки «Гамма-4» с точки зрения повышения эффективности передачи электрической мощности и энергии из ускорительных модулей в нагрузку. Показано, что за счет внесения изменений в конструкцию катодного узла, а также введения центрального обратного токопровода, импеданс диода может быть снижен до требуемого уровня $\sim 0,7$ Ом для согласования с эффективным выходным импедансом формирующей системы. Согласно результатам расчетов это должно привести к повышению пиковой электрической мощности и энергии в диоде на ~ 30 % по сравнению с первоначальным вариантом.

Numerical optimization of the common vacuum diode design for «Gamma-4» facility has been performed. The criterion of the optimization process was increasing the efficiency of energy and power transmission from accelerating modules to the load. It is shown that the impedance of the diode can be decreased to required value $\sim 0,7$ Ohm (matched mode) by changing cathode construction and adding central anode post. According to the results of simulation it should lead to the rise of the energy and power transmission efficiency by ~ 30 % as compared with original design.

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создана четырехмодульная электрофизическая установка «Гамма-4», предназначенная для генерации импульсов тормозного излучения длительностью на полувывоте ~ 50 нс [1]. В одном из режимов работы установки модули включаются параллельно на единую диодную нагрузку с целью увеличения плотности энергии излучения по сравнению с режимом использования в каждом модуле автономного сильноточного вакуумного диода. Первоначальный вариант единой диодной нагрузки установки «Гамма-4» был представлен в [2], там же описана одномерная модель узла нагрузки для расчета выходных электрических характеристик установки с учетом электронных утечек в подводящих вакуумных линиях. К недостаткам данной расчетной модели можно отнести тот факт, что геометрия узла нагрузки моделируется совокупностью одномерных линий с распределенными параметрами. В этом случае фактически не учитываются краевые эффекты в местах соединения линий в реальной геометрии нагрузки. Для уточнения результатов было решено

провести расчеты методом крупных частиц использованием трехмерной модели узла нагрузки.

1. Единая диодная нагрузка (базовый вариант)

В расчетной модели использовалось решение системы уравнений Максвелла совместно с уравнением движения заряженных частиц на трехмерной неравномерной декартовой сетке. Эмиссия электронов с поверхности катода в МИПЛ и диоде осуществлялась в соответствии с моделью ограничения тока эмиссии пространственным зарядом. Порог эмиссии задавался равным $1,0 \cdot 10^7$ В/м.

Расчетная геометрия выходной части установки «Гамма-4» с единой диодной нагрузкой приведена на рис. 1.

Расчетная геометрия включает в себя систему передачи энергии четырех модулей, состоящую из водяной передающей линии (ВПЛ) с поворотом (поз. 1), ускорительной трубки с секционированным изолятором (поз. 3) и магнитоизолированной передающей линии (МИПЛ) (поз. 5), и узел единой диодной нагрузки (поз. 6). На вход каждой

ВПЛ подавался импульс напряжения амплитудой $\sim 2,3$ МВ и длительностью на полувысоте ~ 70 нс. Суммарная мощность электрических импульсов на входе четырех модулей составляет $\sim 7,0$ ТВт, энергия ~ 390 кДж.

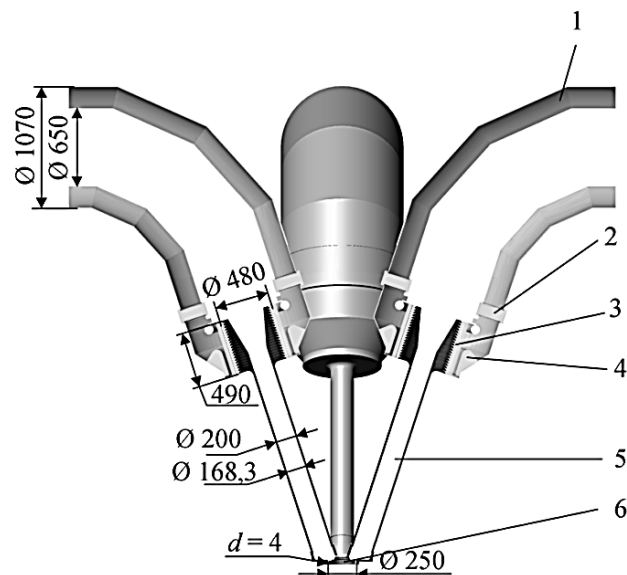


Рис. 1. Расчетная геометрия: 1 – ВПЛ; 2 – проходной изолятор; 3 – секционированный изолятор; 4 – диэлектрическая линза; 5 – МИПЛ; 6 – диод

Базовый вариант конфигурации узла нагрузки представлен на рис. 2. В данном варианте использовался однокольцевой катод с наружным и внутренним диаметрами 250 и 230 мм со скошенной под углом 30° кромкой.

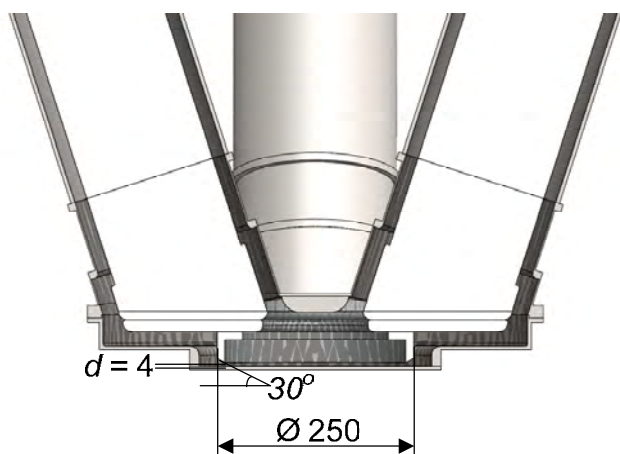


Рис. 2. Единая диодная нагрузка (базовый вариант)

В результате расчетов были получены формы импульсов ускоряющего напряжения $U_\delta(t)$ и тока диода $I_\delta(t)$, мощности $P_\delta(t) = U(t)I(t)$ и энергии

$$W_\delta(t) = \int_0^t P(\tau) d\tau \quad \text{в диоде, представленные на}$$

рис. 3.

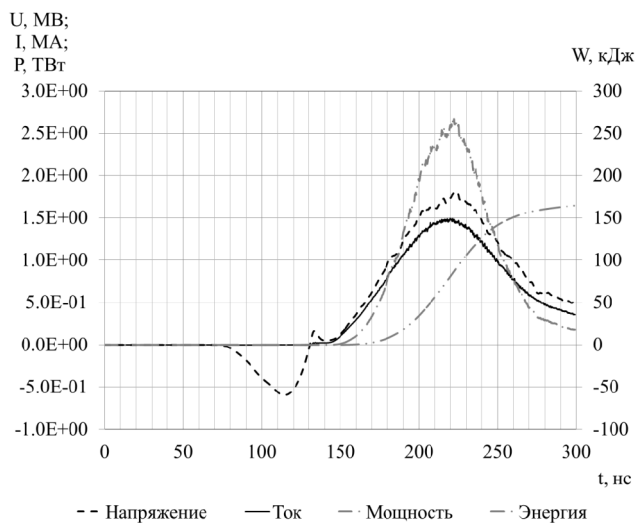


Рис. 3. Напряжение, ток, мощность и энергия в диоде (базовый вариант)

Амплитуды импульсов напряжения U_δ и тока I_δ составили согласно расчетам $\sim 1,8$ МВ и $\sim 1,47$ МА, соответственно импеданс диода $Z_\delta = U_\delta / I_\delta$ в максимуме тока $\sim 1,2$ Ом. Максимальная мощность в диоде P_δ составила $\sim 2,6$ ТВт, энергия в диоде $W_\delta \sim 165$ кДж. Эффективность передачи мощности η_P и энергии η_W в нагрузку составили соответственно 38 % и 43 %. При этом ток утечек $I_{ут}$ в подводящих вакуумных линиях достигает 1,1 МА, или 43 % полного тока.

Согласно полученным результатам, из-за того, что импеданс диода ($Z_\delta \sim 1,2$ Ом) значительно превышает эффективный импеданс генератора ($Z_{ген} = 0,73$ Ом), режим работы диода далек от согласованного. Это приводит к увеличению токов утечки и к снижению эффективности передачи мощности и энергии в нагрузку.

2. Единая диодная нагрузка (варианты оптимизации)

Для повышения эффективности передачи энергии в нагрузку необходимо уменьшить импеданс диода до $\sim 0,7$ Ом (согласованный режим). В настоящей работе исследовалась возможность изменения электрофизических характеристик вакуумного диода за счет:

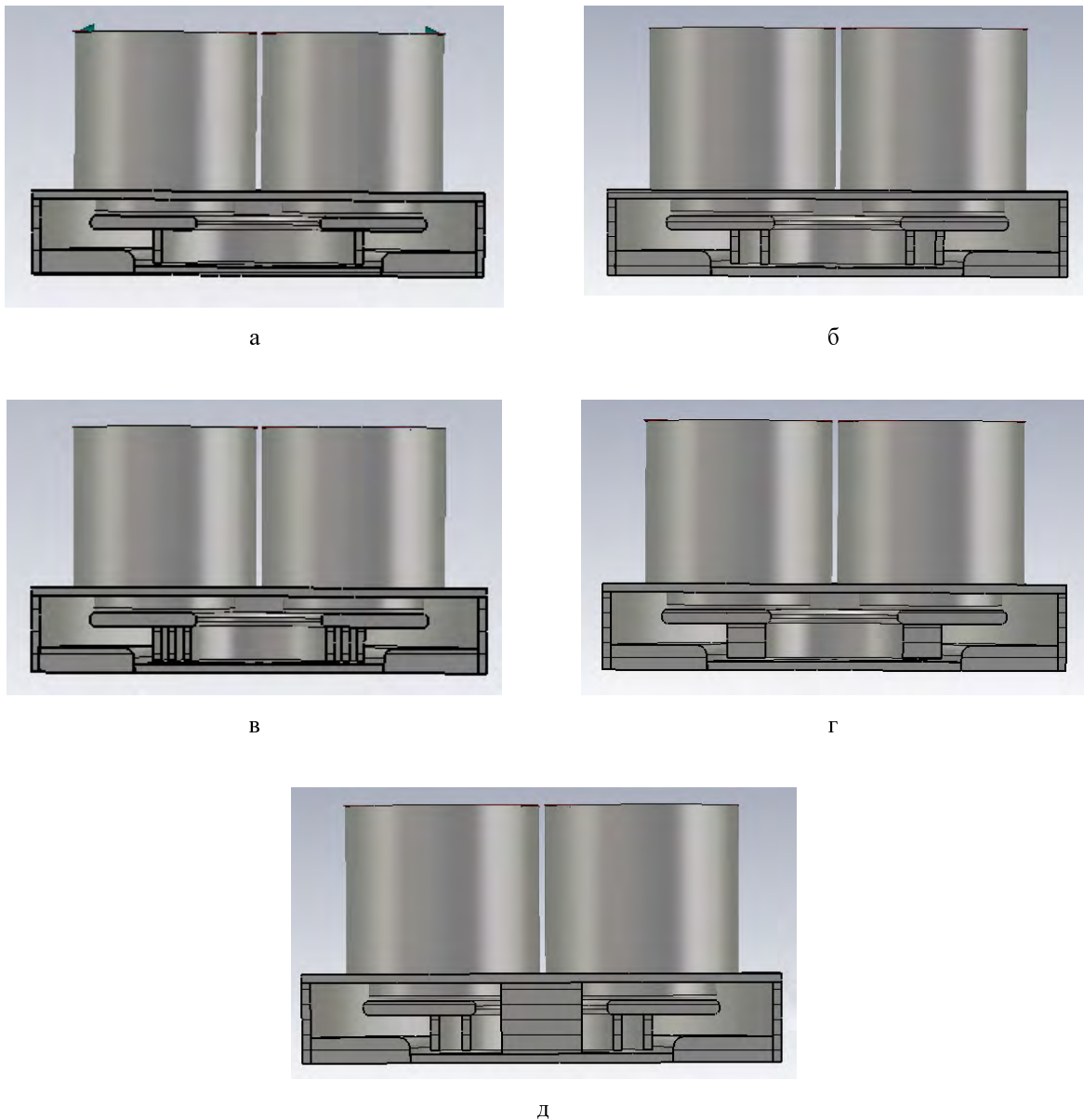


Рис. 4. Варианты конфигурации нагрузки с использованием одного (а), двух (б), трех (в) и одного «широкого» цилиндрических катодов (г), центрального обратного токопровода (д)

- использования нескольких коаксиальных цилиндрических катодов или одного «широкого»;
- использования катодов с плоской эмитирующей кромкой;
- установки на оси цилиндрического обратного токопровода (рис. 4).

Согласно результатам расчетов значительное улучшение выходных характеристик диода по сравнению с базовым вариантом дает использование катодов с плоской эмитирующей кромкой и, особенно, совместно с центральным токопроводом. Следует отметить, что при использовании плоских катодов по сравнению со скошенными

катодами увеличение числа катодов или увеличение радиального размера катода при сохранении внешнего диаметра довольно слабо влияет на электрофизические характеристики диода. Однако такой подход может быть применен для оптимизации радиального распределения тока пучка на аноде.

Так наиболее удачным с точки зрения эффективности передачи мощности и энергии в нагрузку согласно результатам расчетов является вариант с двумя коаксиальными катодами диаметром 250/230 и 180/160 мм, плоской эмитирующей

кромкой и центральным токопроводом диаметром 90 мм (рис. 5).

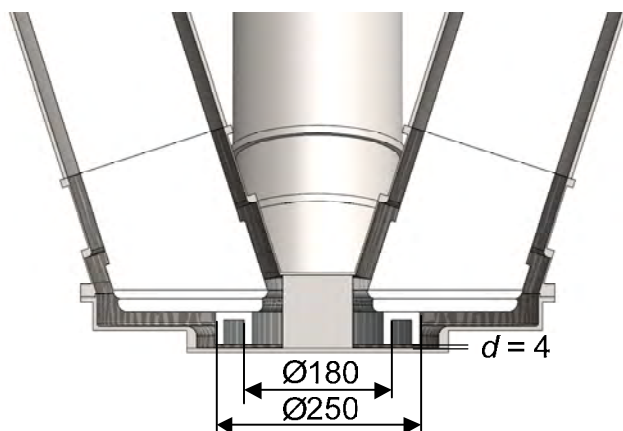


Рис. 5. Единая диодная нагрузка (оптимизированный вариант)

Результаты расчетов для данного варианта приведены на рис. 6.

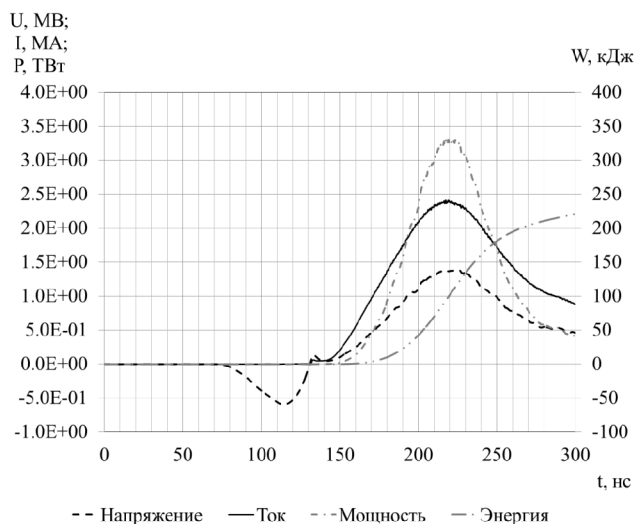


Рис. 6. Напряжение, ток, мощность и энергия в диоде (оптимизированный вариант)

Амплитуды импульсов напряжения U_{δ} и тока I_{δ} для данного варианта составили согласно расчетам $\sim 1,4$ МВ и $\sim 2,4$ МА, импеданс диода $Z_{\delta} = U_{\delta}/I_{\delta}$ в максимуме тока $\sim 0,6$ Ом. Максимальная мощность в диоде $P_{\delta} \sim 3,3$ ТВт, энергия в диоде $W_{\delta} \sim 220$ кДж, что соответственно на 27 % и 33 % выше, чем в базовом варианте. Эффектив-

ность передачи мощности η_P и энергии η_W в нагрузку составили соответственно 48 % и 57 %. При этом ток утечек $I_{ут}$ в подводящих вакуумных линиях снизился до величины 0,4 МА, или 14 % полного тока.

Выводы

На основе трехмерного моделирования проведена оптимизация конфигурации единой диодной нагрузки для создаваемой установки «Гамма-4». Показано, что импеданс сильноточного вакуумного диода можно снизить более чем в 2 раза до требуемого уровня $\sim 0,7$ Ом за счет:

- использования в трубчатом катоде плоской эмитирующей кромки, вместо предлагаемой ранее кромки, скошенной под углом 30° ;
- установки на оси диода цилиндрического обратного токопровода;
- использования нескольких коаксиальных трубчатых катодов или одного катода с увеличенным радиальным размером плоской эмитирующей кромки.

Согласно результатам численного моделирования за счет оптимизации конфигурации единой диодной нагрузки установки ГАММА-4 по сравнению с первоначальным вариантом можно рассчитывать на повышение выходной электрической мощности в диоде с $\sim 2,6$ до $\sim 3,3$ ТВт и энергии в диоде с ~ 165 кДж до ~ 220 кДж. Увеличение составило около 30 %. При этом амплитуды импульсов напряжения и анодного тока для оптимизированной конфигурации диода должны составить $\sim 1,4$ МВ и $\sim 2,4$ МА соответственно.

Список литературы

1. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Гришин А. В. и др. Проект электрофизической установки «Гамма-4» // Сб. докл. XVI Харитоновских тематических научных чтений «Мощная импульсная электрофизика», г. Саров, 2014. С. 32–37.
2. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Гришин А. В. и др. Расчетное обоснование единой диодной нагрузки для экспериментальной установки «Гамма-4» // Труды международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения». Сб. докл. г. Саров, 2017. С. 136–139.