

---

---

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ, СТРУКТУР, ПРОЦЕССОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ОБРАЗОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

---

---

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ИСТОЧНИКАХ С ПЛАЗМЕННЫМ ЭМИТТЕРОМ

*Д.А. Антонович, Д.А. Довгулевич, Д.В. Шидловская  
Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова*

Темпы исследований и внедрения плазменных технологий в современной науке очень высокие. Для упрощения разработки новых установок и сопровождения практических экспериментов необходима разработка программного обеспечения, которое способно быстро адаптироваться к изменившимся условиям и которое содержит инструментарий, упрощающий работу с комплексными моделями.

Моделирование процессов – это один из ключевых методов анализа и оптимизации в тех случаях, когда исследования выполняются для сложного и дорогого оборудования. Для моделирования процессов, протекающих в низкотемпературной плазме, уже существуют пакеты прикладных программ, но все они имеют те или иные недостатки. Поэтому часто приходится создавать узкоспециализированное программное обеспечение для решения конкретных задач.

**Материал и методы.** Материалом исследования послужили математические модели различных физических процессов в установках использующих плазменные источники электронов и методология разработки программного обеспечения. При проведении исследований применялись общепризнанные методы научного познания.

**Результаты и их обсуждение.** Процесс разработки программного обеспечения можно разделить на несколько этапов. Анализ требований к программе – первый этап разработки. На этом этапе формируется основа будущей программы. Поэтому именно на нем необходимо выбрать объект моделирования, сформировать задачи, которые должна решать данная модель, выяснить есть ли достаточный объем контрольных данных, и наличие достаточного математического аппарата. В процессе формирования требований, должны быть учтены не только текущие потребности, но возможность ее модификации в перспективе. Результатом этого этапа является спецификация программы – список согласованных требований.

Следующий этап разработки программы – проектирование. Он представляет собой обработку результатов анализа, в результате которой требования к программе формулируются в виде алгоритмов и диаграмм взаимодействия объектов между собой, являющихся экземплярами соответ-

ствующих классов, которые так же должны быть описаны. На этом этапе выбирается язык программирования, инструменты разработки, и вырабатываются правила оформления кода, и прочие нюансы, связанные с подготовкой к разработке.

Третий – этап реализации заключается в реализации формально описанных алгоритмов и классов на выбранном языке программирования.

Последний этап – тестирование, является достаточно проблемным этапом разработки. В первую очередь, это формальная проверка работоспособности программы на различных входных данных, часто не имеющих физического смысла. Кроме того, необходимо проведение тестовых расчетов и сравнения полученных данных с известными, полученными численными решениями других авторов, результатами экспериментов и наблюдений.

Источники заряженных частиц на основе плазменных эмиттеров показали свою перспективу в качестве источника технологических электронных пучков [1, 2]. При этом многообразие, взаимосвязь и взаимовлияние процессов, сопровождающих формирование эмиттирующей плазмы и технологических электронных пучков требует существенного объема исследовательских и экспериментальных работ при разработке новых технологий воздействия, изменения внешних условий и т.п. [1–3]. Что является существенным сдерживающим фактором для развития подобных, безусловно перспективных, технологий.

Для преодоления подобного сдерживающего фактора, удешевления и оптимизации процесса конструирования источников технологических электронных пучков с плазменным эмиттером, хорошим подходом является моделирование будущего устройства с помощью электронно-вычислительных машин. Приняв, в качестве базовой, разработанную ранее конструкцию источника электронов с плазменным эмиттером, представленную в [4] была составлена физико-математическая модель ускоряющего промежутка электронно-оптической системы такой конструкции, которая позволяет моделировать значения ряда параметров формируемого пучка электронов в конструкциях такого типа в зависимости от входных параметров. На рисунке 1 приведены примеры некоторых расчетных зависимостей, а на рисунке 2 приведена схема графического интерфейса разработанной программы для ввода входных параметров.

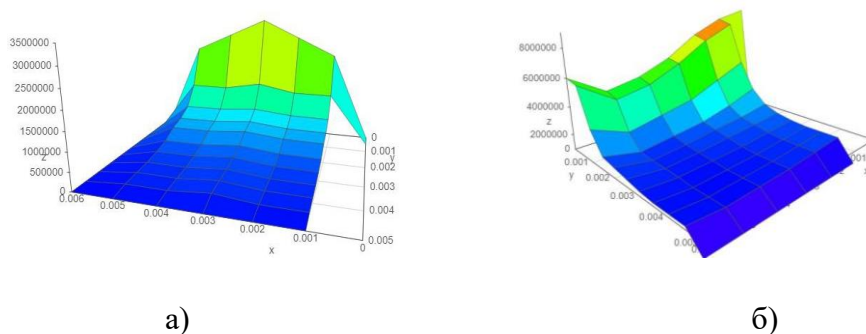


Рисунок 1 – Примеры визуализации рассчитанных параметров: а) выходное напряжение; б) скорость эмиттируемых электронов

**Расчет вторичной плазмы**

Плотность газа $\rho_{газ}$ 0.17846	Вероятность появления ионов вторичной плазмы $\alpha_i$ 0.6	Вероятность рекомбинации вторичной плазмы $\alpha_p$ 0.6	Вероятность рекомбинации электронов первичной плазмы $\alpha_{пк}$ 0.4
Коэффициент инжекции электронов из катода $k$ 1	Коэффициент пропорциональности скорости выбиваемых электронов из катода от $\beta$ 1	Начальная концентрация электронов первичной плазмы $n_0$ 1000000000000000000	Начальная скорость ионов первичной плазмы $V_0$ 10000
Начальный потенциал первичной плазмы $\phi_{пк}$ 200	Напряжение на катоде $\phi_{кат}$ 100	Напряжение на аноде $\phi_{ан}$ 10	Начальное ускоряющее напряжение $U_0$ 30000
Радиус выходного отверстия $R_{от}$ 0.0005	Длина выходного отверстия $L_{от}$ 0.001	Расстояние от центра (оси) потока первичной плазмы до стенки цилиндра с газом $R_{пр}$ 0.005	Расстояние между анодом и катодом $R_{пр}$ 0.01
Длительность фронта импульса $\tau_0$ 0.00001	Длительность потока $\tau$ 0.00001	Момент времени (итерации) $t$ 0	<b>Расчитать</b>

**Рисунок 2 – Графический интерфейс пользователя**

Благодаря разработке такой модели существует возможность без проведения большого объема экспериментальных работ оценить влияние изменения входных условий на параметры формируемой эмитирующей плазмы и формируемого пучка электронов в подобных конструкциях, а также проанализировать полученные результаты.

**Заключение.** Данный подход к разработке программного обеспечения показал высокую эффективность и удобство. Он может применяться как для крупных разработок ведущихся большими группами ученых, так и для точечных проектов, разрабатываемых командами из 2–3 человек.

Работы по дополнению разрабатываемой модели электронно-оптической системы источника электронов с плазменным эмиттером будут продолжены, в перспективе планируется дополнить разработанную модель возможностью получения выходных зависимостей формируемых электронных пучков при изменении элементов конструкции источника электронов с плазменным эмиттером.

1. Плазменные эмиссионные системы с ненакаливаемыми катодами для ионно-плазменных технологий / В.Т. Барченко [и др.], под общ. ред. В.Т. Барченко // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
2. Plasma emission systems for electron- and ion-beam technologies / D. Antonovich, V. Gruzdev, V. Zalesski, I. Pobol & P. Soldatenko // High Temperature Material Processes 21(2):143–159 (2017)
3. Окс, Е.М. Источники электронов с плазменным катодом / Е.М. Окс. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
4. Плазменный источник заряженных частиц для формирования совмещенных ионно-электронных пучков / Д. А. Антонович [и др.] // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. науки. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 285–291.

## **СИСТЕМА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ ДЛЯ ПРИЕМА ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Ю.И. Бохан  
Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова*

*Витебский филиал УО «Белорусская государственная академия связи»*  
В настоящее время для детектирования слабых потоков электромагнитного излучения используются элементы, принцип работы которых основыва-