

УДК 537.533.3, 621.3.032.26

Программный комплекс ELIS для моделирования ЭОС плазменных источников электронов

О. Н. Петрович, В. А. Груздев

Представлен программный комплекс ELIS, предназначенный для моделирования процессов первичного формирования и ускорения пучка в аксиально-симметричных электронно-оптических системах плазменных источников электронов, который позволяет проводить сравнительный анализ формирования электронного пучка в различных физических условиях, в том числе при условии неподвижной поверхности эмиттера. Рассмотрена архитектура разработанного программного комплекса.

PACS: 41.85.-p

Ключевые слова: плазменная граница, эмитирующая поверхность, алгоритм, электронный пучок.

Введение

Плазменные источники электронов (ПИЭЛ) относятся к электронно-оптическим системам (ЭОС) с плазменными образованиями [1]. Использование плазменных образований для формирования электронных пучков требует повышенных рабочих давлений в области генерации газоразрядной плазмы и, как следствие, в области ускорения пучка. Подвижность плазменной границы, ионизационные и сопутствующие им процессы вторичной ионно-электронной эмиссии являются определяющими при формировании пучка в ПИЭЛ двух основных типов: ПИЭЛ с точечным эмиттером, формирующих узкие пучки, и ПИЭЛ с эмиттером большого сечения, формирующих широкие пучки (рис. 1). В предыдущих работах [2—4] был разработан алгоритм и программа численного анализа ПИЭЛ, формирующих остросфокусированные пучки, а также алгоритм стационарной задачи формирования пучков большого сечения в ПИЭЛ. Предыдущие разработки были дополнены алгоритмом моделирования ПИЭЛ с эмиттером большого сечения в нестационарном режиме и алгоритмом моделирования ионизационных процессов и процессов вторичной эмиссии в источниках электронов с твердотельным эмиттером. Указанные алгоритмы были положены в основу программного комплекса ELIS, численный код которого разработан на языке Фортран, а оконный диалоговый интерфейс написан на языке C#.

Назначение и функциональные возможности программного комплекса ELIS

Программный комплекс ELIS предназначен для моделирования процессов первичного формирования и ускорения пучка в аксиально-симметричных электронно-оптических системах плазменных источников электронов с точечным эмиттером и эмиттером большого сечения (см. рис. 1). Пакет прикладных программ (ППП), который составляет основу программного комплекса ELIS, позволяет проводить сравнительный анализ формирования электронного пучка в различных физических условиях:

в поле системы электродов (слаботочные пучки);

в поле, самосогласованном с объемным зарядом электронов пучка (интенсивные пучки);

в поле, самосогласованном с зарядами электронов пучка и всех типов частиц, образующихся в результате ионизационных процессов в ускоряющем промежутке (ионизационные процессы);

в поле, самосогласованном с процессами ионизации и вторичной ионно-электронной эмиссии (ионно-электронная эмиссия).

Положение и форма плазменного эмиттера определяются в результате решения соответствующей самосогласованной задачи.

Область применения программного комплекса, изначально разработанного для ПИЭЛ, расширена дополнительными возможностями, позволяющими проводить моделирование ЭОС с неподвижным эмиттером.

Петрович Ольга Николаевна, старший преподаватель.
Груздев Владимир Александрович, научный сотрудник.
Полоцкий государственный университет.
Беларусь, 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.
Тел. 8-10-375-214-53420. E-mail: poni@hotmail.ru

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2011 г.

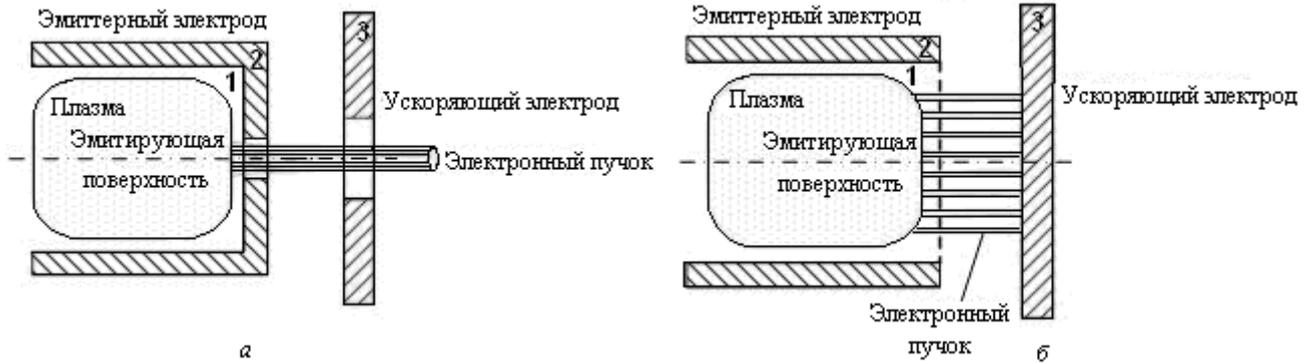


Рис. 1. Типы плазменных эмиссионных систем:

a — ПИЭЛ с точечным эмиттером, формирующие узкие пучки; *b* — ПИЭЛ с эмиттером большого сечения, формирующие широкие пучки; 1 — газоразрядная плазма; 2 — эмиттерный электрод; 3 — ускоряющий электрод

Оконный пользовательский интерфейс программного комплекса ELIS

Пользовательский интерфейс (рис. 2) содержит четыре вкладки: **Информация**, **ПИЭЛ**, **Сеточные ПИЭЛ**, **ТТ ЭОС**, и десять кнопок: **Сохранить**, **Расчитать**, **Открыть**, **Сброс**, **По умолчанию**, **Справка**, **Характеристики пучка**, **Обработка**, **Настройки**, **О программе**.

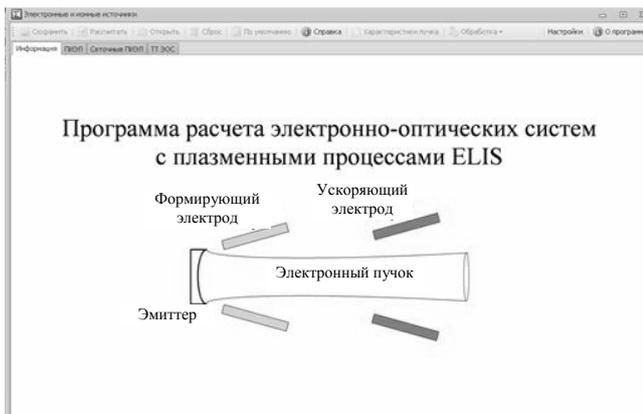


Рис. 2. Окно-приветствие программного комплекса ELIS

Вкладка **Информация** открывает окно-приветствие ППП ELIS, в котором активны только три кнопки: **Справка**, **Настройки**, **О программе**.

Выбор типа моделируемой ЭОС, а именно, источника с плазменным эмиттером или источника с неподвижным эмиттером задается открытием соответствующей вкладки. В случае выбора ЭОС с плазменным эмиттером можно моделировать ПИЭЛ с одиночным эмиссионным каналом (вкладка **ПИЭЛ**) или ПИЭЛ с сеточным эмиттерным электродом (вкладка **Сеточные ПИЭЛ**). Вкладка **ТТ ЭОС** позволяет моделировать источники электронов с неподвижным эмиттером.

В поле **Режим расчета** (рис. 3—5) производится выбор между стационарным или нестационарным (квазистационарным) режимами алгоритма численного моделирования. Уравнения непрерыв-

ности, которыми описываются потоки ионов и парных электронов при моделировании ионизационных процессов, решаются с учетом условий $\frac{\partial \rho_{iu}}{\partial t} = 0$ и $\frac{\partial \rho_{eu}}{\partial t} = 0$ в стационарном режиме или при условии $\frac{\partial \rho_{eu}}{\partial t} = 0$ (при этом $\frac{\partial \rho_{iu}}{\partial t} \neq 0$) в динамическом (квазистационарном) режиме, где ρ_{iu} и ρ_{eu} — объемные заряды ионов и парных электронов.

В поле **Модель расчета** (см. рис. 3—5) задаются физические условия, которые учитываются при моделировании формирования пучка в ЭОС. Выбор модели расчета позволяет проводить сравнительный анализ формирования электронных пучков во внешнем поле системы электродов (модель **Слаботочный пучок**), в вакуумном режиме самосогласованного поля (модель **Интенсивный пучок**), в режиме учета ионизационных эффектов (модель **Ионизационные процессы**) и процессов вторичной ионно-электронной эмиссии (модель **Вторичная ионно-электронная эмиссия с эмиттерного электрода** и модель **Вторичная ионно-электронная эмиссия из плазмы**).

Для вкладки **ПИЭЛ** (см. рис. 3) в режиме расчета **Стационарный** активны три модели: **Слаботочный пучок**, **Интенсивный пучок**, **ионизационные процессы**. В режиме расчета **Квазистационарный** активны три следующие модели: **Ионизационные процессы**, **Вторичная ионно-электронная эмиссия с эмиттерного электрода**, **Вторичная ионно-электронная эмиссия из плазмы**.

Для вкладки **Сеточные ПИЭЛ** (см. рис. 4) в режиме расчета **Стационарный** активны две модели: **Интенсивный пучок**, **Ионизационные процессы**. В режиме расчета **Квазистационарный** активны две следующие модели: **Ионизационные процессы**, **Вторичная ионно-электронная эмиссия из плазмы**.

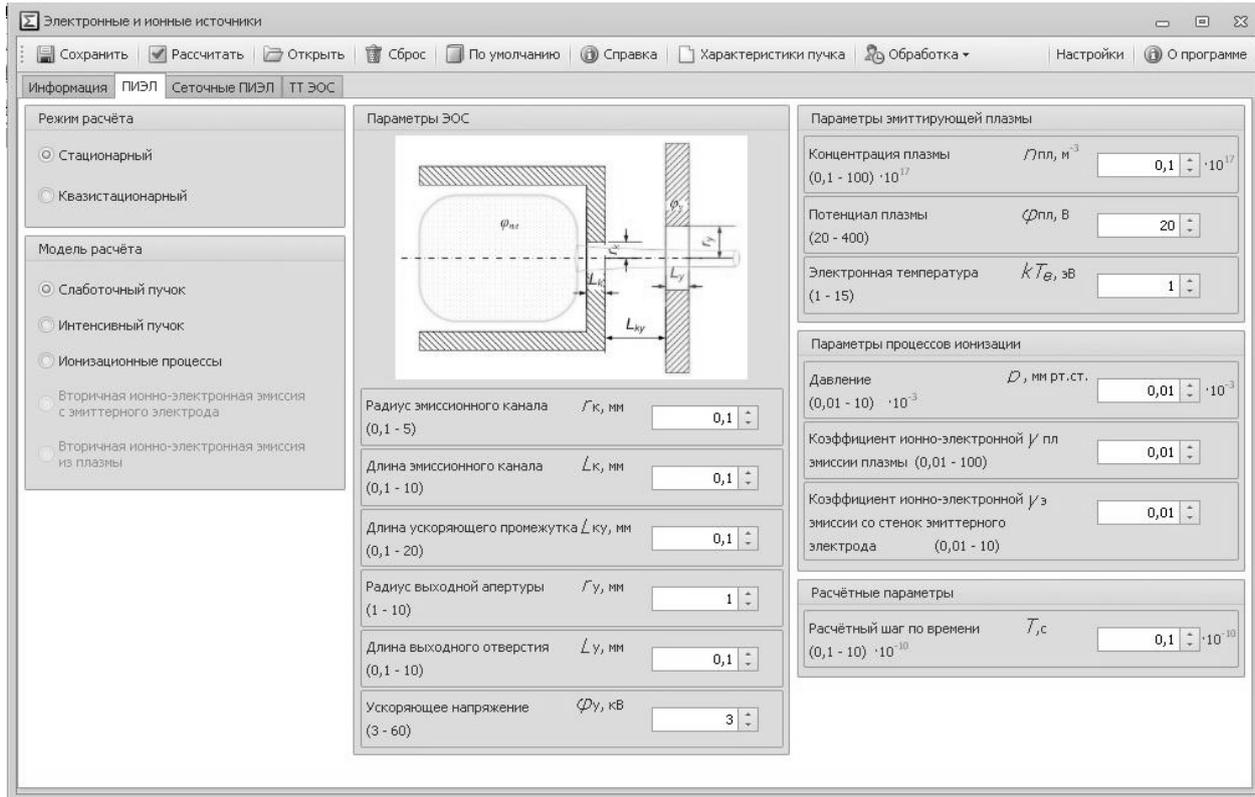


Рис. 3. Оконный пользовательский интерфейс ППП ELIS. (Вкладка ПИЭЛ)

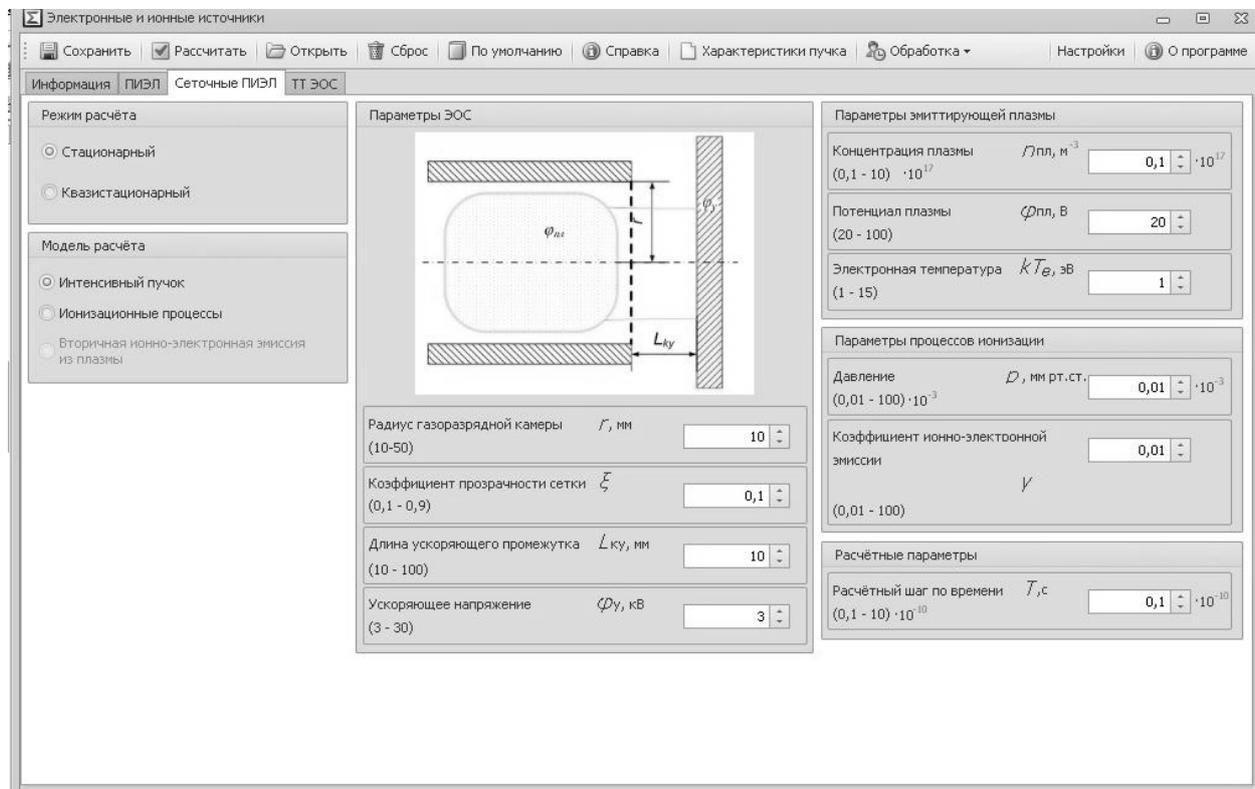


Рис. 4. Оконный пользовательский интерфейс ППП ELIS. (Вкладка Сеточные ПИЭЛ)

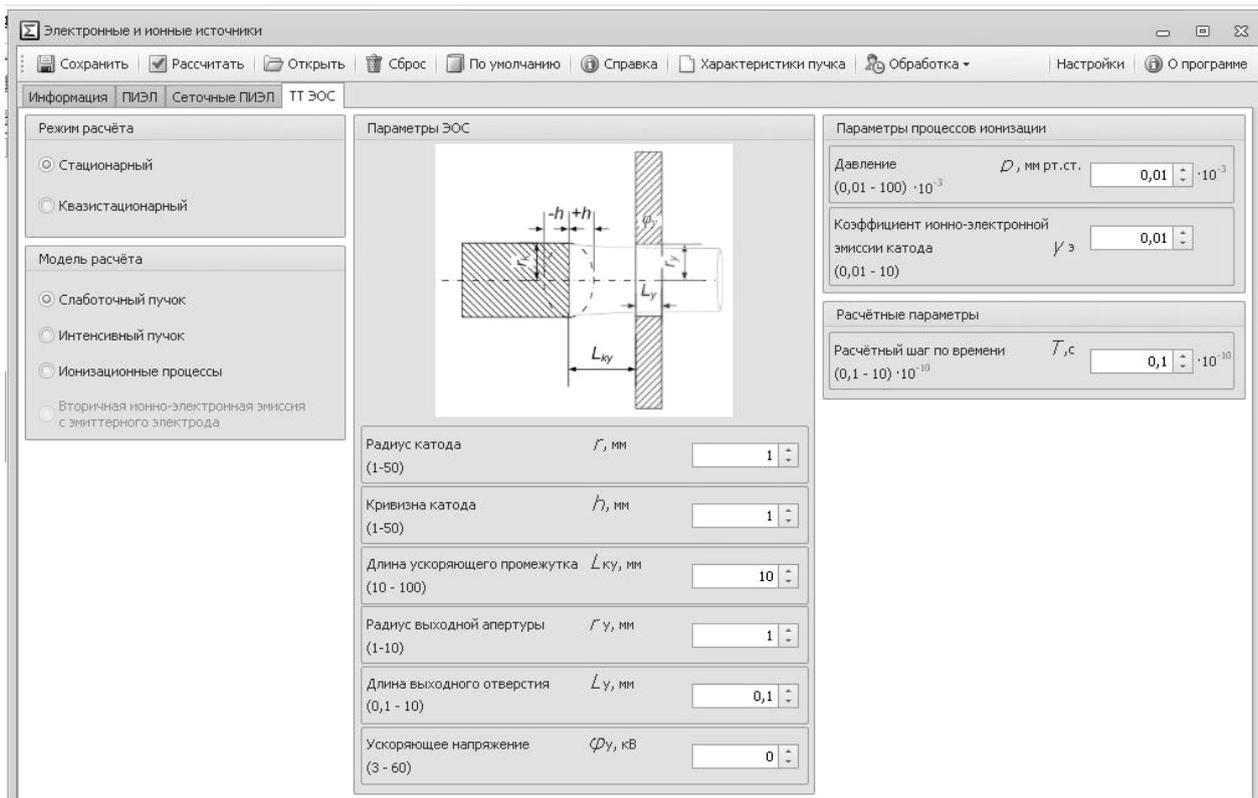


Рис. 5. Оконный пользовательский интерфейс ППП ELIS. (Вкладка ТТ ЭОС)

Для вкладки ТТ ЭОС (см. рис. 5) в режиме расчета **Стационарный** активны три модели: **Слаботочный пучок**, **Интенсивный пучок**, **Ионизационные процессы**. В режиме расчета **Квазистационарный** активны две модели: **Ионизационные процессы**, **Вторичная ионно-электронная эмиссия с эмиттерного электрода**.

Входные параметры модели задаются в четырех полях: **Параметры ЭОС**, **Параметры эмиттирующей плазмы**, **Параметры процессов ионизации**, **Расчетные параметры**.

Входными параметрами задачи расчета ЭОС являются: потенциалы электродов, геометрия аксиально-симметричной ЭОС, электронная концентрация n_{pl} и потенциал плазмы в разрядном промежутке φ_{pl} , энергия теплового движения электронов в эмиттере (или kT_e), коэффициенты ионно-электронной вторичной эмиссии плазмы и эмиттерного электрода, временной шаг, давление. Потенциал ускоряющего электрода φ_y и потенциал эмиттирующей плазмы φ_{pl} определяются относительно эмиттерного электрода с эмиссионным каналом.

Рабочие кнопки предназначены для работы с файлом входных данных (кнопки **Сохранить**, **Открыть**, **Сброс**, **По умолчанию**), для запуска рас-

четной программы (кнопка **Рассчитать**), для получения справочной информации (кнопки **Справка**, **Настройки**, **О программе**), для работы с файлами выходных данных (кнопки **Характеристики пучка**, **Обработка**). При нажатии на кнопку **Обработка** (рис. 6) раскрывается дополнительное меню с шестью командами: **Распределение потенциала**, **Траектории электронов пучка**, **Вакуумное поле**, **Распределение объемных зарядов**, **Расчетная область**, **Все результаты**.

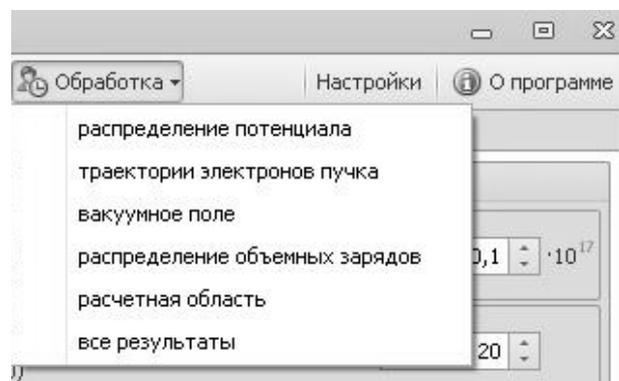


Рис. 6. Раскрывающееся меню кнопки. Обработка

Назначение рабочих кнопок и команд представлено в табл. 1.

Таблица 1

Назначение рабочих кнопок и команд

Рабочая кнопка/команда	Назначение	
Сохранить	Запись входных данных из полей Параметры ЭОС, Параметры эмитирующей плазмы, Параметры процессов ионизации, Расчетные параметры в файл входных данных для последующей передачи в расчетную программу	
Рассчитать	Запуск расчетной программы	
Открыть	Считывание сохраненных последний раз входных данных и отображение их в полях входных данных	
Сброс	Удаление файла входных данных	
По умолчанию	Загрузка входных данных, установленных по умолчанию в поля входных данных	
Справка	Вызов файла помощи, в котором представлены сведения о пользовательском интерфейсе, работе с входными данными, обработке выходных данных, алгоритмах расчета и другая важная информация	
Характеристики пучка	Открытие файла, содержащего расчетные данные о характеристиках пучка	
Обработка	Распределение потенциала	Запуск модуля обработки выходных данных распределения потенциала
	Траектории электронов пучка	Запуск модуля обработки выходных данных траекторий электронов пучка
	Вакуумное поле	Запуск модуля обработки распределения потенциала
	Распределение объемных зарядов	Запуск модуля обработки выходных данных распределения объемных зарядов
	Расчетная область	Запуск модуля обработки выходных данных расчетной области
	Все результаты	Запуск модуля обработки всех выходных данных
Настройки	Просмотр настроек и версии (полная/демонстрационная) программы	
О программе	Просмотр сведений о программе	

Программные модули

Архитектура ППП ELIS включает в себя следующие программные модули: диалоговый модуль DIALOG, модуль входных данных INPUT, модуль выходных данных OUTPUT, расчетные модули FIELD, EMITTER, PATH, CHARGE, BEAM, IONST, IONNOST, ELECST, ELECNOT, IONSTREAM, GAMMASTREAM, GAMMAPATH, GAMMACHARGE, GAMMABEAM.

Диалоговый модуль DIALOG задает оконный пользовательский интерфейс.

Модуль входных данных INPUT считывает входные данные, задаваемые пользователем в диалоговом окне, и передает их в расчетную программу. Осуществляет выбор расчетной программы в зависимости от активного диалогового окна и выбранных пользователем конфигураций в полях **Режим расчета** и **Модель расчета**. Модуль INPUT интегрирован в диалоговый пользовательский интерфейс.

Модуль выходных данных OUTPUT позволяет просматривать полученные результаты графически или в виде массивов числовых данных. Все выходные данные записываются в файлы данных с расширением *.dat. Визуализация данных численного моделирования реализована средствами программного комплекса MathCad. Выходными параметрами программы являются: распределение потенциала; траектории электронов пучка и электронов вторичной ионно-электронной эмиссии;

характеристики пучка (ток, диаметр, расходимость, первеанс, фазовый портрет); распределение плотности тока; распределение объемного заряда электронов пучка, ионов и парных электронов, электронов вторичной эмиссии; форма и положение эмитирующей поверхности (подвижный эмиттер); обратный ионный поток на стенки электродов или в плазму (плазменный эмиттер).

Расчетный модуль FIELD предназначен для вычислений распределения потенциала электрического поля, создаваемого системой электродов, самосогласованного с объемным зарядом электронов пучка и с объемными зарядами всех типов заряженных частиц в ЭОС.

Расчетный модуль EMITTER предназначен для определения положения и формы плазменного эмиттера.

Расчетный модуль PATH находит траектории огибающих трубок тока электронов пучка.

Расчетный модуль CHARGE вычисляет плотность тока и плотность объемного заряда электронов пучка.

Расчетный модуль BEAM определяет характеристики формируемого пучка.

Расчетные модули IONST и IONNOST находят ионный поток и вносимый им объемный заряд в стационарном и нестационарном (квазистационарном) режимах формирования пучка, соответственно.

Расчетные модули ELECST и ELECNOT определяют поток парных электронов и вносимый

ими объемный заряд в стационарном и нестационарном (квазистационарном) режимах формирования пучка, соответственно.

Расчетный модуль IONSTREAM вычисляет обратный ионный поток в эмитирующую плазму и плотность эмиссионного тока с поверхности возмущенной обратным ионным потоком плазмы.

Расчетный модуль GAMMASTREAM вычисляет обратный ионный поток на стенки эмиттерного электрода и плотность тока γ -электронов с поверхности электрода.

Расчетный модуль GAMMAPATH предназначен для траекторного анализа потока γ -электронов.

Расчетный модуль GAMMACHARGE вычисляет объемный заряд, вносимый γ -электронами.

Расчетный модуль GAMMABEAM находит ток, вносимый γ -электронами в ток пучка.

В зависимости от активного диалогового окна и выбранных пользователем конфигураций в полях **Режим расчета** и **Модель расчета** в программу численного анализа подключаются различные расчетные модули (табл. 2).

Заключение

Разработанный программный комплекс ELIS предназначен для моделирования процессов первичного формирования и ускорения пучка в аксиально-симметричных электронно-оптических системах плазменных источников электронов и позволяет проводить сравнительный анализ формирования электронного пучка в различных физических условиях, в том числе при условии неподвижной поверхности эмиттера. Архитектура разработанного программного комплекса оптимизирована для вышеупомянутых задач.

Программный комплекс ELIS зарегистрирован в Национальном центре интеллектуальной собственности РФ (свидетельство № 347).

Литература

1. Завьялов М. А., Крейнфельд Ю. Е., Новиков А. А., Шантурин Л. П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. — М.: Энергоатомиздат, 1989.

Таблица 2

Подключение расчетных модулей в зависимости от выбора пользователя

Вкладка	Режим расчета	Модель расчета	Расчетные модули программы
ПИЭЛ	Стационарный	Слаботочный пучок	FIELD, EMITTER, PATH, BEAM
		Интенсивный пучок	FIELD, EMITTER, PATH, CHARGE, BEAM
		Ионизационные процессы	FIELD, EMITTER, PATH, CHARGE, BEAM, IONST, ELECST
	Квазистационарный	Ионизационные процессы	FIELD, EMITTER, PATH, CHARGE, BEAM, IONNOST, ELECST или ELECNOST
		Вторичная ионно-электронная эмиссия с эмиттерного электрода	FIELD, EMITTER, PATH, CHARGE, BEAM, IONNOST, ELECST или ELECNOST, GAMMASTREAM, GAMMAPATH, GAMMACHARGE, GAMMABEAM
		Вторичная ионно-электронная эмиссия из плазмы	FIELD, EMITTER, PATH, CHARGE, BEAM, IONNOST, ELECST или ELECNOST, IONSTREAM, GAMMASTREAM, GAMMAPATH, GAMMACHARGE, GAMMABEAM
Сеточные ПИЭЛ	Стационарный	Интенсивный пучок	FIELD, EMITTER, PATH, CHARGE, BEAM
		Ионизационные процессы	FIELD, EMITTER, PATH, CHARGE, BEAM, IONST, ELECST
	Квазистационарный	Ионизационные процессы	FIELD, EMITTER, PATH, CHARGE, BEAM, IONNOST, ELECST или ELECNOST
		Вторичная ионно-электронная эмиссия из плазмы	FIELD, EMITTER, PATH, CHARGE, BEAM, IONNOST, ELECST или ELECNOST, IONSTREAM
ТТ ЭОС	Стационарный	Слаботочный пучок	FIELD, PATH, BEAM
		Интенсивный пучок	FIELD, PATH, CHARGE, BEAM
		Ионизационные процессы	FIELD, PATH, CHARGE, BEAM, IONST, ELECST
	Квазистационарный	Ионизационные процессы	FIELD, PATH, CHARGE, BEAM, IONNOST, ELECST или ELECNOST
		Вторичная ионно-электронная эмиссия	FIELD, PATH, CHARGE, BEAM, IONNOST, ELECST или ELECNOST, GAMMASTREAM, GAMMAPATH, GAMMACHARGE, GAMMABEAM

2. Груздев В. А., Петрович О. Н. Метод численного анализа газонаполненных электронно-оптических систем с подвижным плазменным катодом // Сб. матер. междунар. конференции по вычислительной математике. — Новосибирск, 2004. Ч. II. С. 590.

3. Петрович О. Н. Алгоритм моделирования триодной электронно-оптической системы с плазменным эмиттером

большого сечения// Матер. VI Междунар. конф. "Взаимодействие излучений с твердым телом". — Минск, 2005. С. 411.

4. Петрович О. Н., Груздев В. А. Программа численного анализа динамической электронно-оптической системы с плазменным эмиттером//Тезисы XIII Всерос. семинара "Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики". — Москва. 2007. С. 106.

The software package ELIS for simulation of EOS of PES

O. N. Petrovich, V. A. Gruzdev

Polotsk State University

29 Blokhin str., Novopolotsk, 211440, Belarus

E-mail: poni@hotmail.ru

The software package ELIS is designed for the simulation of formation and accelerating of the beam in an axially symmetric electron-optical systems of plasma electron sources and allows to realize comparative analysis of the formation of the electron beam in different physical conditions, including a fixed emitting surface. The architecture of developed software package considered.

PACS: 41.85.-p

Keywords: plasma boundary, emitting surface, algorithm, electron beam.

Bibliography — 4 references.

Received September 22, 2011