

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕНА В БЕЗНАКАЛЬНОМ ТЕРМОЭМИССИОННОМ КАТОДЕ

*П.А. Дыбский, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., А.В. Лоян, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
Н.Н. Кошелев, ст. науч. сотр., Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», г. Харьков, Украина*

### Введение

Одним из ключевых моментов при проектировании БНК является определение температурных полей, возникающих при работе катода. Соответствующая краевая задача в условиях, когда происходит теплопередача излучением в открытых и замкнутых полостях, ограниченных диффузно-серыми поверхностями, степень черноты которых зависит от температуры, является нелинейной и нестационарной. Точное решение может быть найдено только для областей канонической формы (см., например, [1]). Для решения прикладных задач необходимо воспользоваться численными методами, среди которых большое распространение получил метод конечных элементов (МКЭ). Численному моделированию теплообмена в отдельных элементах БНК были посвящены работы как отечественных, так и зарубежных авторов (см. библиографию в работах [2 - 4]).

Целью данной работы является разработка конечно-элементной (КЭ) модели для проведения численного анализа теплообмена всей конструкции катода.

### Конечно-элементная модель катода

Задача теплообмена в безнакальном термоэмиссионном катоде была решена с помощью программы МКЭ ANSYS™. Моделирование было осуществлено в осесимметричной постановке. Типовое разбиение на конечные элементы исследуемой области показано на рис. 1. Степень дискретизации области предварительно определялась с помощью тестовых задач об излучении, для которых существует аналитическое решение [1]. КЭ модель катода, использованная при моделировании, включала в себя порядка 2000 четырехугольных линейных изопараметрических КЭ с общим количеством примерно 3000 узлов, точное значение

которых зависит от конструктивных особенностей катода.

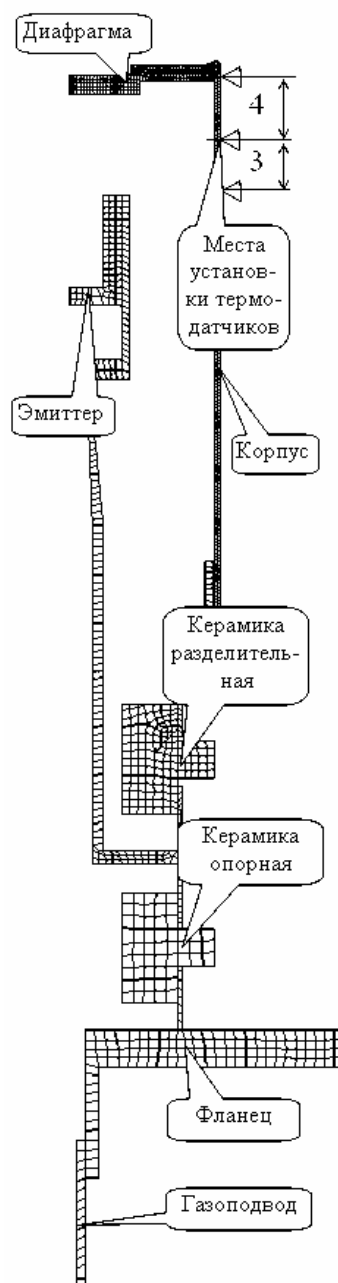


Рис. 1. КЭ модель катода

Основные режимы работы катода и соответствующие им интервалы времени, отсчитанные от момента включения катода, приведены в таблице.

Таблица

Основные режимы работы катода

№	Наименование режима	Время
1	Включение катода	0 сек
2	Разогрев газа в полости и диафрагменной области (7000°K)	от 0.001 сек
3	Разогрев эмиттера (40Вт)	от 0 до 90 сек
4	Стационарный режим эмиттера 25Вт	от 90 сек до выключения

При моделировании были рассмотрены следующие виды теплообмена:

- подвод тепла тепловым потоком заданной суммарной мощности через поверхность эмиттера;
- подвод тепла радиационным излучением в диафрагменной области;
- подвод тепла путем конвективного теплообмена между рабочим телом заданной температуры и диафрагмой;
- теплообмен излучением внутри катода;
- отвод тепла излучением в окружающую среду заданной температуры;
- отвод тепла в рабочее тело заданной температуры через внутреннюю поверхность газоподвода.

Значения теплофизических свойств материалов катода были взяты из различных источников [5, 6, 7]. Степень черноты диффузно-серых поверхностей, как правило, зависит от температуры. Для материалов катода в первом приближении были использованы данные из справочного пособия [5] (см. рис. 2).

Однако следует учитывать возможные изменения этих характеристик, вызванные условиями работы конкретного изделия. В нашем случае это разложение остаточных углеводородов, а также химическое соединение вольфрамовых и молибденовых сплавов с примесями кислорода и азота, присутствующими в рабочем теле, газе ксеноне. В результате образуется сажа и оксинитридные пленки, что, как известно, приводит к увеличению степени черноты поверхности. В данной работе коррекция этих зависимостей проводилась путем введения коэффициентов, которые определялись на основании сравнения результатов

численного моделирования и экспериментальных измерений.

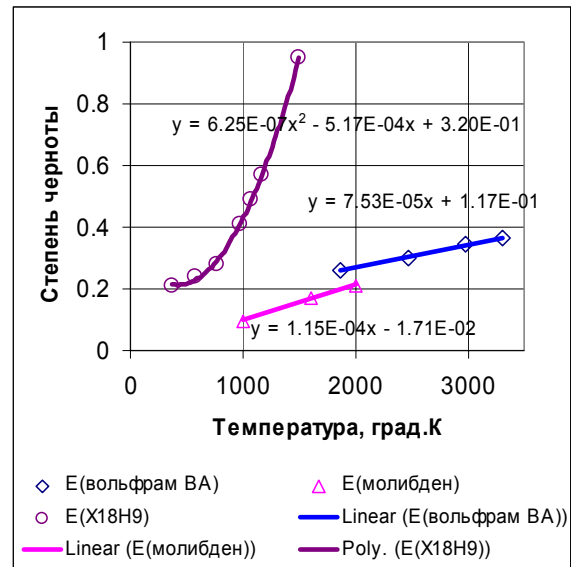


Рис. 2. Степень черноты материалов катода

Другим важным фактором, существенно влияющим на распределение температуры и ее временную зависимость, является тепловой поток, проходящий через эмиттер во время работы катода. Определение изменения теплового потока через эмиттер было также одной из задач данного исследования.

### Результаты моделирования

Функции зависимости суммарной мощности теплового потока от времени, принятые на данном этапе исследования, показаны на рис. 3.

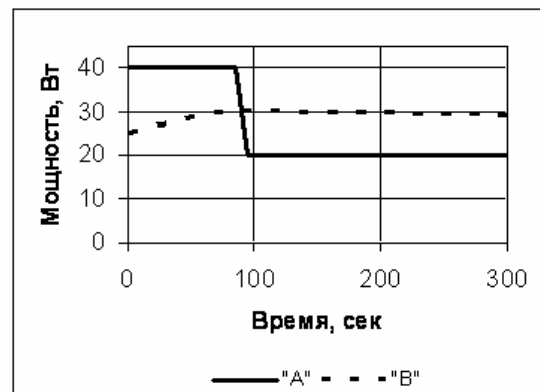


Рис. 3. Изменение мощности теплового потока

Температурное поле стационарного режима работы катода для теплового потока «В» показано на (рис. 4).

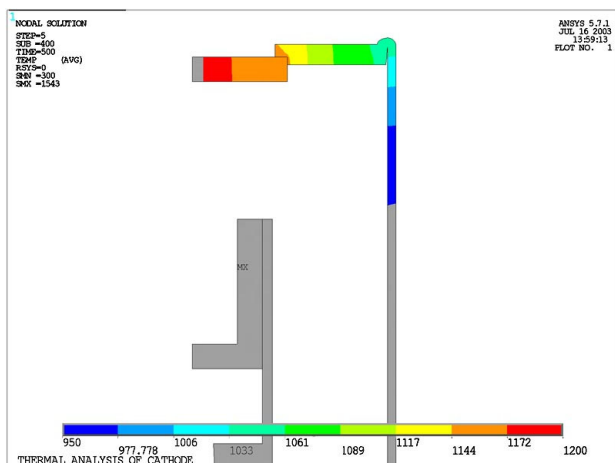


Рис. 4. Температурное поле в стационарном режиме

На рис. 5 сравниваются результаты численного моделирования и экспериментальных измерений температуры поверхности корпуса катода, полученной в точках установки термпар (рис. 1). Случай «А» соответствовал тепловому потоку «А» и значениям 0.3, 0.7, 0.8 степени черноты для стали X18H9, молибдена и вольфрама (ВА) соответственно. Случай «В» - тепловой поток «В», степень черноты стали такая, как на Рис. 2, взятая с коэффициентом 1.5.

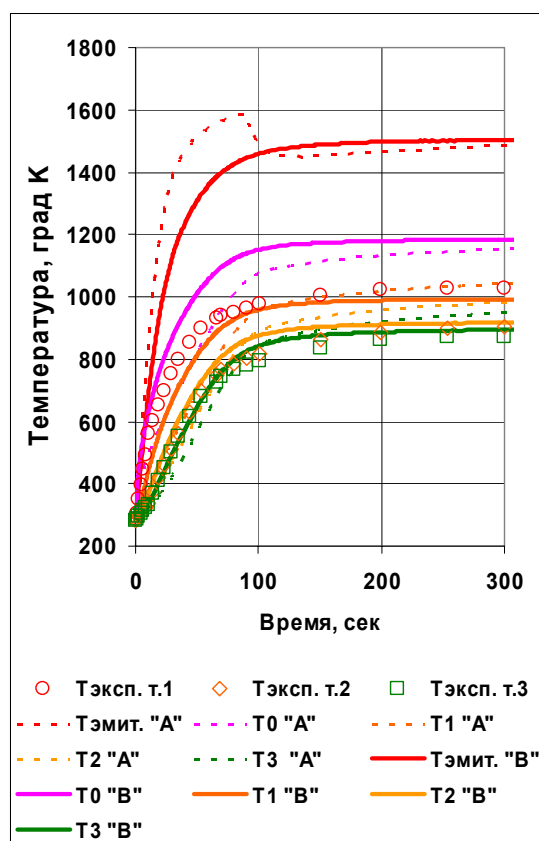


Рис. 5. Изменение температуры в точках измерения

## Выводы

В работе продемонстрирована возможность адекватного численного анализа сложной прикладной нелинейной нестационарной задачи радиационного теплообмена с помощью МКЭ.

Необходимо уточнение теплофизических свойств материалов, в частности значений степени черноты, которые, как показали исследования, существенно влияют на тепловые потоки при нестационарных режимах. При этом следует учитывать зависимость характеристик материала от спектрального состава излучения.

## Литература

1. Зигель Р., Хауэлл. Дж. Теплообмен излучением. - М.: Мир, 1975.- 938 с.
2. Modern Trends of Electric Propulsion Activity in Russia / V. Kim, V. Garkusha, V. Murashko, G. Popov, V. Tikhonov // Proceedings of 26<sup>th</sup> IEPC conference, Japan.- 1999.- P. 27-32.
3. Nishida M., Tahara H. An Overview of Electric Propulsion Activities in Japan // Proceedings of 26<sup>th</sup> IEPC conference, Japan.- 1999.- P. 41-55.
4. Arhipov B. Heat Balance in a Neutralizer Cathode of Stationary Plasma Thruster (SPT) // Proceedings of 26<sup>th</sup> IEPC conference, Japan.- 1999.- P. 720-726.
5. Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов: Справочное пособие / Под ред. Р.А. Нилендера.- М.: Энергия, 1973.- 336 с.
6. Gebhart V. Heat Conduction and Mass Diffusion. - McGraw-Hill, 1993.- 634 p.
7. Мусин Р.А. Конюшков Г.В. Соединение металлов с керамическими материалами.- М.: Машиностроение, 1991.- 224 с.

*Поступила в редакцию 31.05.03*

**Рецензенты:** д-р техн. наук, профессор Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», г. Харьков; д-р техн. наук, профессор О.К. Морачковский, Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков.