

УДК 519.63:533.9.07

С.И. ПЛАНКОВСКИЙ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина*

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАТОДНЫХ УЗЛОВ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ CAD/CAE СИСТЕМАХ

*Описана методика газодинамического проектирования катодных узлов с полым термокатодом. В качестве целевой функции проектирования предложено использовать минимизацию расхода защитного газа при условии обеспечения докритического парциального давления активных газов. На основе численных экспериментов определены зоны допустимых режимов для аксиального и комбинированного способа подачи защитного газа. Критерием обеспечения возможных режимов подачи принято отсутствие циркуляционных течений в полости катодного узла. Показано, что повышение частоты вращения потока приводит к более раннему образованию циркуляционных потоков, что ухудшает защиту термокатода.*

**Ключевые слова:** катодный узел, критерий обеспечения докритического парциального давления активных газов, математическое моделирование, численный эксперимент, интегрированные CAD/CAE системы.

### Введение

В последнее время особый интерес вызывает возможность создания высокоресурсных плазмотронов с полыми термокатадами. Предполагается, что применение новых эмиссионных материалов и режимов подачи защитного газа позволит создать катодные узлы с большим, чем у существующих конструкций ресурсом [1 – 3].

В работах [4, 5] показано, что для выбора формы проточной части катодных узлов и величины расхода защитного газа необходимо дополнить существующие модели расчета многокомпонентных течений условием обеспечения докритического парциального давления активных газов.

Наиболее эффективным применение разработанных моделей может быть при организации численных экспериментов на параметрических моделях в современных CAD/CAE системах.

Одной из проблем проведения проектировочных расчетов является большое число варьируемых параметров. При применении сложных математических моделей это может привести к резкому увеличению вычислительных затрат и невозможности получения решения в требуемое время. Для того чтобы решить эту проблему, целесообразно предварительно выделить основные факторы, влияющие на целевую функцию и определить области изменения данных параметров. Для задачи проектирования катодных узлов такими параметрами могут являться величина расхода и способ подачи защитного газа, характерные САД-параметры (диаметр канала, зазор

между катодом и стенкой). Однако до настоящего времени для катодных узлов такие задачи с учетом условием обеспечения докритического парциального давления активных газов не решались.

**Целью работы** является определение зоны допустимых режимов при различных способах подачи защитного газа в катодных узлах с полым термокатодом в среде интегрированных CAD/CAE систем.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для формулировки задачи проектирования должна быть сформирована геометрическая и физическая модели. Схема рассматриваемого катодного узла представлена на рис. 1. Начало отсчёта  $z = 0$  выбрано на выходном срезе канала.

Изучались два способа подачи защитного газа – аксиальный, когда через центральное отверстие в полой катодной и концентрическую щель между катодом и стенкой канала газ подается строго вдоль оси  $Z$ , и комбинированный, когда через полой катод подается аксиальный поток, а через концентрическую щель – закрученный. Вариант с подачей закрученного потока через полой катод не рассматривался, так как его реализация на практике связана с серьезными трудностями.

В качестве целевой функции проектирования рассматривалась минимизация расхода защитного газа при условии обеспечения докритического давления активных газов.

В качестве основных параметров при аксиаль-

ной подаче газа были выбраны числа Рейнольдса потока на входе в полый катод  $Re_1$  и концентрическую щель  $Re_2$ .

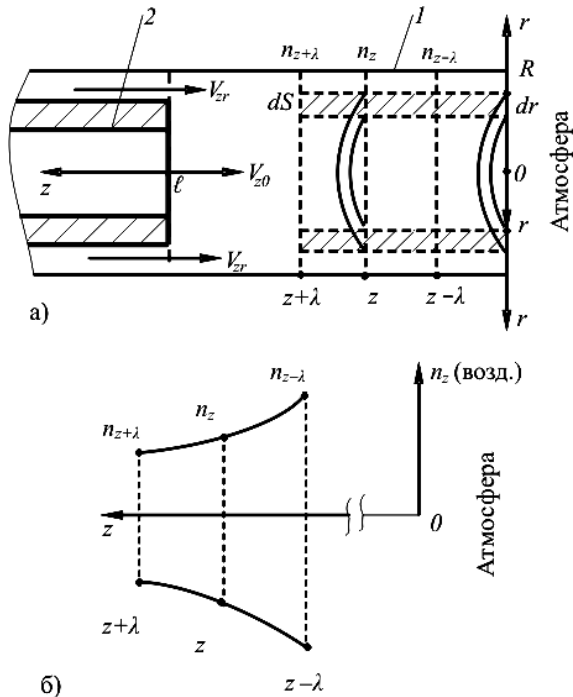


Рис. 1. Схема катодного узла с полым катодом: а – 1 – цилиндрический канал плазмотрона, 2 – полый катод; б – распределение концентрации молекул воздуха вдоль оси  $z$

При определении значения  $Re_2$  в качестве масштаба использовалось значение зазора  $\delta$  между катодом и стенкой канала. В ходе численного моделирования было установлено, что при определенных соотношениях  $k = Re_2/Re_1$  в области канала, непосредственно примыкающей к выходному сечению полого катода, образуется тороидальный вихрь (см. рис. 2). Образование такого вихря приводит к резкому снижению эффективности защиты термокатада, поскольку воздух, диффундирующий во встречном потоке аргона со стороны среза катодного канала, подхватывается и переносится вихревым течением непосредственно к эмитирующей поверхности, причем скорость такого переноса на порядки превосходит скорость диффузии.

Возникновение тороидального вихря происходит при различных величинах  $k$  в зависимости от длины канала катодного узла. В качестве исходной предпосылки было принято, что зона допустимых режимов подачи защитного газа будет ограничиваться режимами, при которых не возникают противотоки в прикатодной области. Для определения границ этой зоны для случая аксиального течения в ходе численного эксперимента определялась величина максимальной осевой скорости в объеме  $\Omega$ ,

ограниченном сферой, расположенной между выходными сечениями катода и канала катодного узла, т.е. значение  $\max(V_z)_\Omega$ .

В ходе численного эксперимента для различных относительных значений длины катодного канала  $\bar{l} = l_k/R$  варьировалось значение  $k$ . Так как ось  $z$  была направлена противоположно направлению подачи газа, случай  $\max(V_z)_\Omega \geq 0$  свидетельствовал о возникновении противотока.

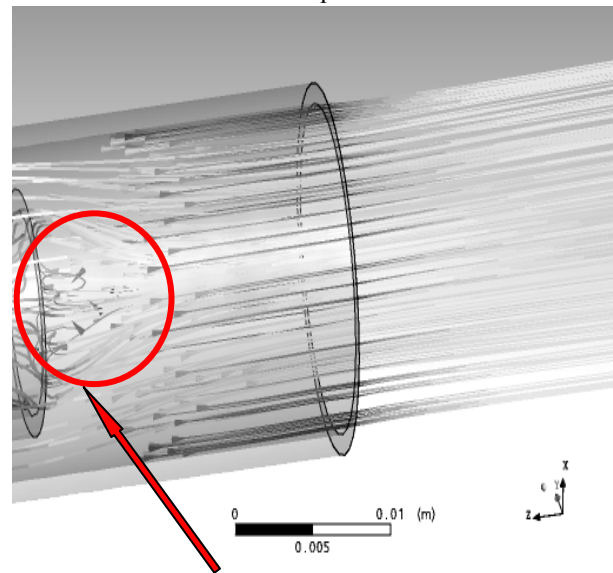


Рис. 2. Картина течения при аксиальной подаче газа с образованием тороидального вихря

В результате моделирования были получены графики, позволяющие определить границы зоны допустимых режимов аксиальной подачи защитного газа (рис. 3). Зона режимов с образованием тороидального вихря заштрихована. Анализ этих графиков показывает, что при уменьшении  $\bar{l}$  граница перехода к течению с образованием тороидального вихря смещается в сторону больших значений  $k$ . При значениях  $k \geq 1,7$  образование тороидального вихря неизбежно во всем выбранном диапазоне  $\bar{l}$ .

Строго говоря, возникновение такого вихря не является условием неизбежного отравления эмиттера. Однако участок канала катодного узла, на котором он формируется, является абсолютно бесполезным с точки зрения обеспечения защиты термокатада. Поэтому назначение режимов подачи защитного газа, исходя из условия отсутствия в катодном узле течений, направленных в сторону термокатада, представляется оправданным.

При дальнейших численных экспериментах при фиксированном значении  $\bar{l}$  с учетом определенной ранее зоны допустимых режимов для акси-

альной подачи варьировались значения  $Re_1$  и  $Re_2$  (рис. 4). Целевой функцией задачи оптимизации являлась величина суммарного расхода защитного газа через каналы  $\min(G_1 + G_2)$  при ограничении  $\max(P_{\text{возд}})|_{\text{line1}} \leq P_{\text{кр}}$ , где line1 – отрезок прямой, проходящей по срезу полого катода перпендикулярно его оси.

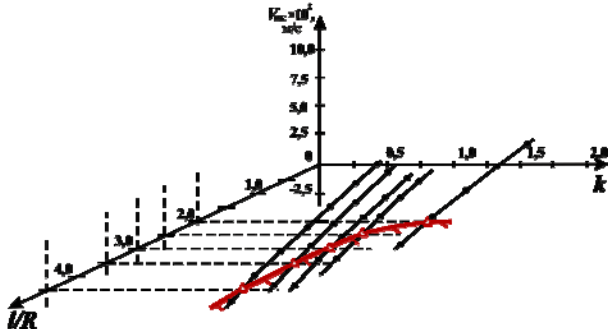


Рис. 3. Определение зоны допустимых режимов при аксиальной подаче защитного газа

Анализ влияния рассматриваемых параметров на значение максимального парциального давления воздуха показал, что фактором, оказывающим наибольшее влияние на его величину, является скорость подачи газа через полый катод.

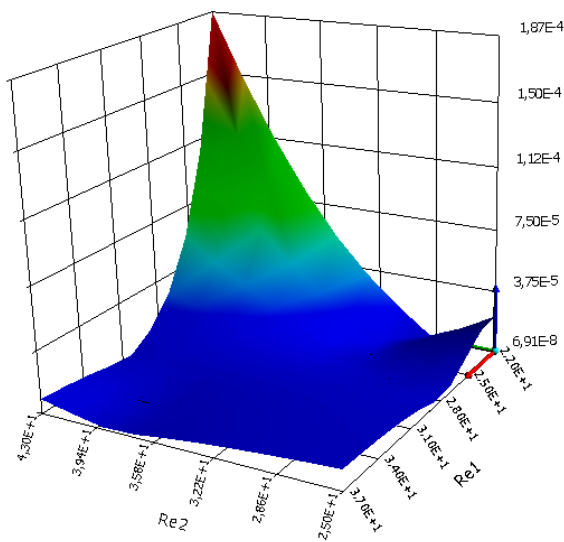


Рис. 4. Результаты численного эксперимента по выбору параметров расхода защитного газа при аксиальной подаче

При комбинированной подаче газа в полость катодного узла (аксиальной через полый катод и вихревой через коаксиальную щель между катодом и стенкой канала) характер течения изменяется. При определенных соотношениях  $k = Re_2 / Re_1$  для каждой относительной длины  $\bar{l} = l_k / R$  и частоты вращения потока на входе  $v$  наблюдается образование

циркуляционного течения. При этом размеры зоны рециркуляции могут быть настолько велики, что эффективную защиту термокатода нельзя обеспечить в принципе, так как воздух прорывается по оси катодного канала непосредственно к поверхности эмиттера.

Вихревая подача защитного газа в полость катодного канала обычно применяется по двум причинам. Во-первых – для пространственной стабилизации дуги на оси канала, во-вторых – для уменьшения теплового воздействия на катод в случае применения охлаждаемых электродов. Анализ результатов моделирования показал, что увеличение частоты вращения потока, подаваемого через коаксиальную щель между катодом и стенкой канала приводит к тому, что зона допустимых режимов подачи газа в координатах  $k - \bar{l}$  смещается в сторону меньших значений  $k$  (рис. 5).

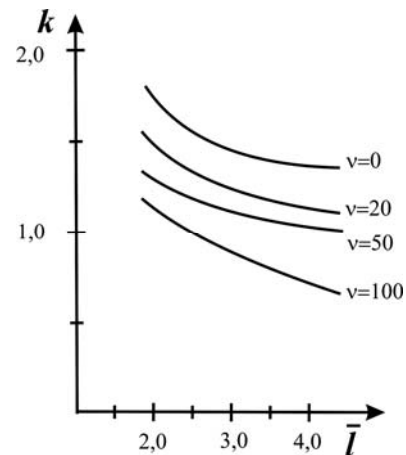


Рис. 5. Определение зоны допустимых режимов при комбинированной подаче защитного газа

Таким образом, применение интенсивной раскрутки потока защитного газа способствует более раннему образованию циркуляционных потоков и является потенциально опасным с точки зрения защиты термокатода. С этой точки зрения предпочтительнее следует отдавать аксиальной подаче защитного газа с параметрами, обеспечивающими отсутствие тороидальных вихрей вблизи эмитирующей поверхности.

Таким образом, применительно к проектированию катодных узлов последовательность решения задачи поиска параметров модели выглядит следующим образом. Исходная геометрия проточной части катодного узла строится при помощи существующих методик расчета плазмотронов и эмпирических подходов к их проектированию [6, 7].

На основании этих данных строится параметрическая модель катодного узла. Для построения этой модели может быть использована любая из

специализированных CAD систем. В качестве геометрических параметров целесообразно назначать относительные геометрические размеры, выбирая в качестве масштаба, например, диаметр канала проточной части, как это обычно делается в задачах аэрогидродинамики (рис. 6).

Полученная геометрическая модель импортируется в CAE систему. Как правило, она должна быть доработана средствами встроенных модулей.

На основе построенной расчетной сетки в специализированном CFD пакете формируется математическая модель решения задачи: граничные и на-

чальные условия, характеристики материалов и т.п. Ряд элементов модели могут быть заданы в виде параметров. Например, величина массового расхода защитного газа, соотношение между осевой и окружной компонентами скорости на входе и др.

После решения задачи в модуле постпроцессора для задачи проектирования необходимо задать целевые функции. При проектировании катодных узлов с термокатодами одну из таких функций необходимо строить на основании введенного критерия обеспечения докритического давления активных газов.



Рис. 6. Схема взаимодействия модулей CAD/CAE системы при решении задачи газодинамического проектирования катодных узлов

Модуль оптимизации, встраиваемый в интегрированные CAD/CAE пакеты, позволяет реализовать различные алгоритмы численного эксперимента, генерирует план численного эксперимента, имеет встроенные инструменты для обработки результатов расчета, включая статистическую обработку.

На основании проведенных расчетов информация об оптимальных геометрических параметрах передается в модуль CAD для оформления конструкторской документации, а оптимальные физические параметры (например, режимы подачи газа) сохраняются для последующей передачи разработчикам АСУ плазменного оборудования.

Работа выполнена при поддержке Державного фонду фундаментальних досліджень України в рамках проекта Ф 25.4/112.

## Выводы

1. Описана методика решения газодинамического проектирования катодных узлов в среде CAD/CAE систем. В качестве целевой функции проектирования предложено использовать минимизацию расхода защитного газа при условии обеспечения докритического давления активных газов.

2. На основе численных экспериментов определены зоны допустимых режимов для аксиального и

комбінованого способу подачі захисного газу. Для цього пропонується застосовувати умову недопущення утворення торообразних вихрей в порожнині катодного вузла.

2. Показано, що підвищення частоти обертання потоку захисного газу сприяє більш ранньому утворенню циркуляційних потоків і є потенційно небезпечним з точки зору захисту термокатода.

### Литература

1. Plankovsky S. High-current-density cathodes based on barium gadfate with tungsten / S. Plankovsky, A. Taran, E. Ostrovsky, S. Ordanjan // IEEE International vacuum electronic conference IVEC – 2007, Kitakyushu, Japan. – P. 249-250.

2. Кривцов В.С. Нестационарная математическая модель для описания многомерных теплогидравлических эффектов в камере плазмотрона при предстартовой продувке / В.С. Кривцов, С.И. Планковский, Е.В. Цегельник // Открытые информацион

ные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2004. – Вып. 24. – С. 126-130.

3. Кривцов В.С. Оптимізація газодинамічних характеристик дугових плазмотронів з порожнистим катодом / В.С. Кривцов, С.І. Планковський, Є.В. Цегельник, Є.К. Островський, А.О. Таран, А.В. Лоян // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2006. – №3. – С. 106-113.

4. Планковский С.И. Методика расчета основных газодинамических параметров потока инертного газа в плазмотроне / С.И. Планковский, Е.В. Цегельник, Е.К. Островский, В.А. Максименко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 7 (43). – С. 94-98.

5. Дзюба В.Л. Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы / В.Л. Дзюба, К.А. Корсунов. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2007. – 448 с.

6. Коротеев А.С. Плазмотроны: конструкции, характеристики, расчет / А.С. Коротеев, В.М. Миронов, Ю.С. Свирчук – М.: Машиностроение, 1993. – 296 с.

Поступила в редакцию 20.11.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.С. Добровольский, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

### ГАЗОДИНАМІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ КАТОДНИХ ВУЗЛІВ В ІНТЕГРОВАНІХ CAD/CAE СИСТЕМАХ

С.І. Планковський

Описано методику газодинамічного проектування катодних вузлів з порожнистим термокатодом. У якості цільової функції проектування запропоновано використовувати мінімізацію витрати захисного газу за умови забезпечення до критичного парціального тиску активних газів. На базі числових експериментів визначено зони можливих режимів для аксіального та комбінованого способу подачі захисного газу. У якості критерію можливого режиму подачі прийнята відсутність циркуляційних течій в порожнині катодного вузла. Показано, що підвищення частоти обертання потоку призводить до більш раннього утворення циркуляційних потоків, що погіршує захист термокатоду.

**Ключові слова:** катодний вузол, критерій забезпечення докритичного парціального тиску активних газів, математичне моделювання, числовий експеримент, інтегровані CAD/CAE системи.

### THE GAS-DYNAMIC DESIGNING OF CATHODE ASSEMBLY IN COMPUTER-INTEGRATED CAD/CAE SYSTEMS

S.I. Plankovsky

The method of the gas-dynamic designing of cathode assembly with a hollow thermocathode is described. As an objective function of designing it is suggested to use minimization expense of protective gas based on condition of providing of subcritical partial pressure of active gases. On the basis of numeral experiments the areas of the possible regime for the axial and combined methods of protective gas serve are certain. The providing criterion of the possible serve regimes is accept absence of circulation flows in the cavity of cathode assembly. It is show that over the increase of rotation frequency of stream brings to more early formation of circulation streams that worsens defence of thermocathode.

**Key words:** cathode assembly, criterion of providing of subcritical partial pressure of active gases, mathematical design, numeral experiment, computer-integrated CAD/CAE systems.

Планковский Сергей Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: s.plank@khai.edu.