

## **К вопросу управления запуском самонагреваемых газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов средствами информационных технологий в системе поддержки принятия решений для плазменной очистки дымовых газов**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Предложено новое применение самонагреваемых газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов (СГПВК) с внутренним поджигом электрореактивных двигателей для задачи плазменной очистки дымовых газов. Приведены основные параметры запуска, схемы СГПВК и системы энергоснабжения. Исследован первый этап запуска СГПВК – в режиме тлеющего разряда. Предложены новые параметры и рекомендованы новые формы зависимостей основных параметров разряда источника напряжения зажигания для уменьшения вероятности возникновения пятен второго рода на поверхности катода, реализация которых может иметь положительное влияние на ресурс СГПВК.

**Ключевые слова:** газоразрядные полые высокоэмиссионные катоды, электроракетные (электрореактивные) двигатели, газоразрядные процессы, плазменная очистка дымовых газов.

### **Введение**

Известно, что к основным техногенным загрязнителям, которые вызывают региональные или глобальные изменения состояния атмосферы и здоровья населения, можно отнести оксиды углерода, диоксид серы, оксиды азота, галогенорганические и углеводные соединения, тяжелые металлы, аэрозоли и т.п. Стационарными источниками загрязнения в Украине в 2009 г. было выброшено в атмосферу 39 279 тыс. т вредных веществ. Наибольшую часть представляли выбросы предприятий обрабатывающей промышленности (36%), производства электроэнергии, газа и нефти (33%) и добывающей промышленности (25%) [1].

В последнее время в Украине возникает диспропорция между постепенным наращиванием объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и изменением технологии производств, устаревшими схемами и механизмами очистки и уменьшением выбросов как от стационарных, так и от подвижных источников загрязнения. Необходимо внедрение новейших инновационных технологий и замена производственного оборудования на менее энергоемкое и экологически безопасное.

Одной из многих перспективных и бурно развивающихся направлений очистки газов от загрязняющих веществ является метод плазменной очистки газов. Наибольший научно-практический интерес, как правило, представляет низкотемпературная плазма, получаемая различными способами при сравнительно низком - атмосферном давлении. Уникальность низкотемпературной слабоионизированной плазмы, создаваемой газовыми разрядами обусловлена ее значительной термодинамической неравновесностью, которая возникает при создании сильного электрического поля в зоне существования плазмы. Газоразрядная плазма для очистки газов успешно применяется в ряде стран (США, Россия, Германия, Япония и т.д.). Это – использование плазмохимических реакторов, установок со стримерной короной,

атмосферные фильтры с тлеющим разрядом, плазменно-дуговые установки по переработке нефтепродуктов и многие другие [2-5].

Однако многие перечисленные выше методы обладают рядом существенных недостатков: высокая энергоемкость, сложность конструкции, низкая динамика запуска (для решения специальных задач) и т.д., что может быть решено применением самонагревных газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов (СГПВК) с внутренним поджигом электрореактивных двигателей, которые по основным параметрам плазмы, ресурса и надежности не уступают основным плазменным устройствам, используемым при решении задач очистки газов газоплазменным методом.

Актуальность научной проблемы заключается в применении новых технологий и усовершенствовании процесса плазменной очистки газов с тем, чтобы расширить область использования этого метода на различных передвижных и стационарных источниках загрязнения атмосферного воздуха.

## 1. Постановка задачи исследования

Несмотря на ряд преимуществ, СГПВК с внутренним поджигом обладает достаточно высокой стартовой эрозией материала термоэммиттера, обусловленной спецификой и стадиями формирования рабочего дугового разряда. Так, в работе [6] показано, что при запуске СГПВК нормальному дуговому разряду с диффузионной привязкой предшествует тлеющий разряд. Между тлеющим и дуговым разрядами, в свою очередь, может иметь место дуговой разряд с катодными пятнами, что может существенно снижать ресурс катода (в особенности при наличии катодных пятен второго рода).

Одним из путей решения этой проблемы - создание с помощью информационных технологий управляемого алгоритма запуска источников электропитания, благодаря чему скорость нарастания разрядного тока не будет превышать критической величины ( $di/dt < 10^6$  A/(см<sup>2</sup>с)), что в свою очередь, не приведет к возникновению катодных пятен второго рода [7].

Анализ полного запуска СГПВК является комплексной научно-прикладной проблемой, требующей рассмотрения целого ряда процессов как в плазмообразующем газе, так и в твердом теле материала термоэммиттера. Поэтому в данной статье затрагиваются вопросы только начального этапа, т.е. формирования тлеющего разряда.

Таким образом, задача исследования заключается в уменьшении скорости нарастания тока от источника питания вспомогательного разряда при формировании тлеющего разряда при запуске СГПВК ЭРД.

## 2. Решение поставленной задачи

Известно [8-11], что наиболее перспективной с точки зрения энергозатрат и ресурса является схема СГПВК, совмещающая следующие свойства:

- Плазмообразующий газ подается через рабочую газоразрядную полость, при этом образуется положительный (по отношению к эмиссионной поверхности) столб плазмы, что является причиной уменьшения

разрядного напряжения и улучшения эмиссионных свойств поверхности эмиттера.

- Для достижения требуемого давления в рабочей полости при меньших значениях расхода плазмообразующего газа применяют диафрагму.
- Для улучшения эмиссионных свойств рабочей поверхности эмиттера за счет снижения работы выхода электронов используют активирующие вещества.

Получили наибольшее распространение два основных типа СГПВК [8,9,11]: СГПВК с внутренним поджигом (рис.1.4, а), в котором корпус с диафрагмой играет роль поджигного электрода и первичные электроны формируются путем пробоя промежутка (вспомогательного разряда) между термоэммиттером и диафрагмой и СГПВК с внешним безнакальным поджигом (рис.1.4, б).

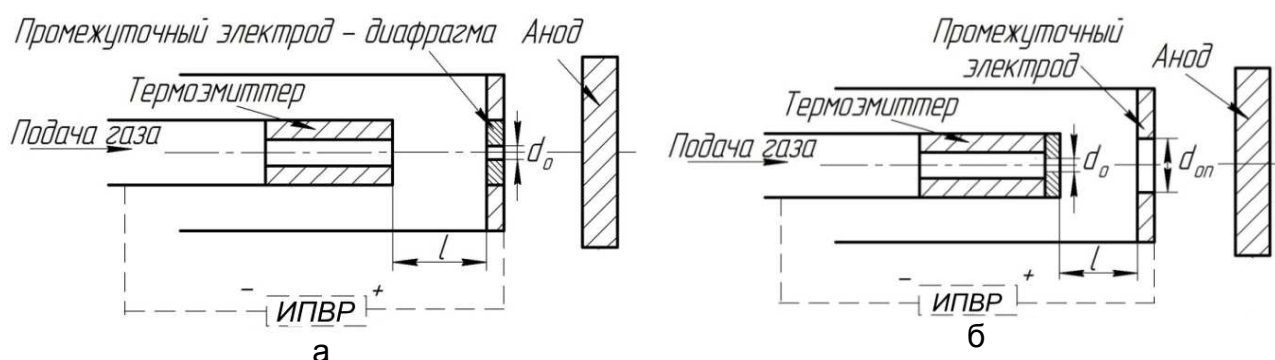


Рис. 1.4. Основные схемы СГПВК: а – с внутренним поджигом; б – с внешним поджигом: ИПВР – источник электропитания вспомогательного (поддерживающего) разряда

Как видно из рис. 1.4, б функцию поджигного электрода выполняет дополнительный корпус с отверстием диаметром  $d_{оп}$ . Пробой в этом случае (обеспечивающий первичные электроны в разрядном промежутке) осуществляется между промежуточным электродом и диафрагмой диаметром  $d_0$ .

Для запуска СГПВК ЭРД, как правило, широко применяют блоки поджига, обеспечивающие пробивное напряжение и включающие в себя ИПВР – источник электропитания вспомогательного разряда между термоэммиттером и поджигным электродом [12]. На практике ИПВР включает в себя маломощные источники электропитания:

- источник напряжения зажигания (ИН-3) – пробивного напряжения;
- источник дополнительного (поддерживающего) тлеющего разряда (ИП-ПР);
- источник дополнительного (поддерживающего) дугового разряда (ИП-ДР).

При прочих равных условиях основным недостатком СГПВК с внешним поджигом по сравнению с СГПВК с внутренним поджигом является значительно худшие условия запуска. Это обусловлено тем, что их запуск приходится осуществлять зажиганием разряда в его внешнем столбе, который характеризуется значительно более низким давлением газа, изменяющимся как по длине, так и по радиусу разрядного промежутка между термоэммиттером (катодом) и анодом. Поэтому в предложенной работе объектом исследования является разработанный и созданный в межотраслевом научно-техническом центре космической энергетики и двигателей (МНТЦ КЭД СГПВК) с внутренним поджигом.

## 2.1. Описание экспериментального оборудования и исследуемого СГПВК

Основные экспериментальные исследования проводили на лабораторной вакуумной установке, предназначенной для отработки, тестирования, проверки и испытаний ЭРД и их узлов. Вакуум в вакуумной камере объемом 3 м<sup>3</sup> обеспечивался откачной системой, включающей в себя: два форвакуумных насоса ВН-6 производительностью 160 л/с и два диффузионных паромасляных насоса ВА-8-4 производительностью 2·10<sup>3</sup> л/с. Предельный вакуум составлял 2·10<sup>-5</sup> Торр. Изменение давления в вакуумной камере контролировали с помощью ионизационно-термопарного вакуумметра ВИТ-3. Для проведения измерений вольт-амперных характеристик во временном диапазоне 10<sup>-9</sup>...10<sup>-5</sup> с использовали двухканальные цифровые запоминающие осциллографы «RIGOL» DS5022M.

Схема СГПВК с системой электропитания показана на рис.2. С помощью источника напряжения зажигания (ИН-3) создавалась первичная ионизация плазмообразующего газа искровым разрядом между вспомогательным электродом – диафрагмой и термоэммиттером. После пробоя и в процессе формирования тлеющего разряда ИН-3 может успешно использоваться и как источник питания подготовительного и дополнительного зарядов (ИП-ПР и ИП-ДР). Источник питания основного разряда (ИП-ОР) подключается к основному межэлектродному промежутку между катодом и анодом.

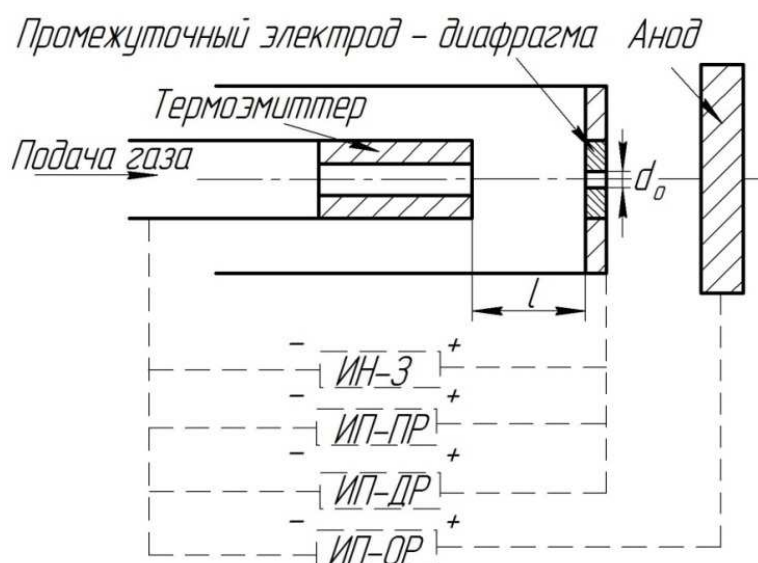


Рис. 2. Конструктивная и электрическая схемы исследуемого СГПВК

ИН-3 – источник напряжения зажигания;  
 ИП-ПР – источник питания подготовительного разряда;  
 ИП-ДР – источник питания дополнительного разряда;  
 ИП-ОР – источник питания основного разряда

Запуск проводили в такой последовательности:

1. Подача ксенона через СГПВК и анод.
2. Включение источников электропитания одновременно: ИН-3, ИП-ДТР, ИП-ДДР и ИП-ОР.

- После зажигания основного разряда питание ИН-3 и ИП-ПР отключается, и двигатель продолжает работу при совместном действии двух разрядов – основного и дополнительного дугового.

## 2.2. Основные результаты экспериментального исследования

На рис. 3 показана зависимость изменения тока искрового вспомогательного разряда в ИН-3. Очевидно, что время существования вспомогательного разряда составляет не менее  $3 \cdot 10^{-5}$  с. По теоретическим расчетам разработанной математической модели [13] в этот период уже происходит развитие тлеющего разряда. Поэтому отчасти искровой разряд выполняет роль ИП-ПР. Однако работа в качестве ИП-ПР в данном случае трудно контролируема (падающая часть кривой на рис. 3), что требует более детального рассмотрения.

Интерес также представляет и абсолютное значение тока разряда между вспомогательным электродом и эмиттером. Величина тока 25...30 А подтверждает наличие достаточно высокого уровня эрозии в период функционального запуска. Иными словами, разряд между диафрагмой и эмиттером может также быть причиной эрозии аналогично основному разряду.

Так, в работе [7] с помощью метода фоторазведки было показано, что при токе разряда на вольфраме от 2,6 до 50 А плотность тока в катодном пятне составляла до  $10^5$  А/см<sup>2</sup>.

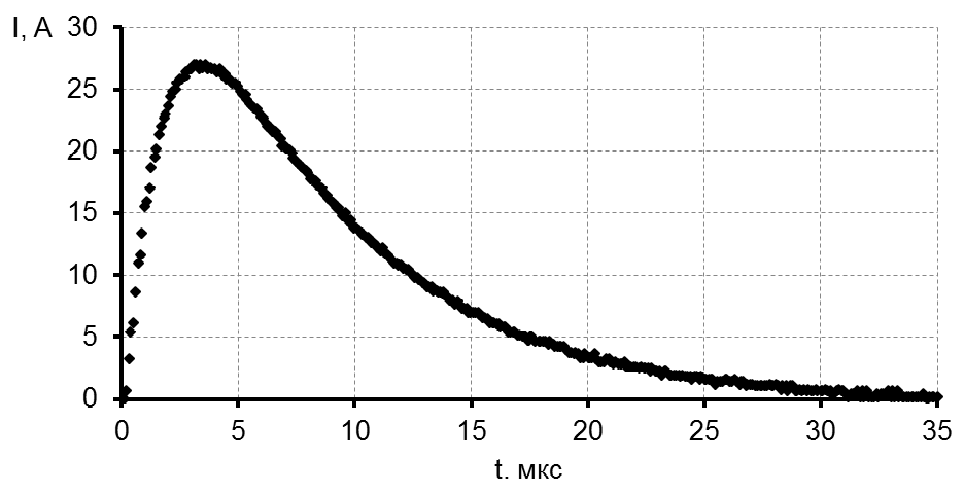


Рис. 3. Изменение тока вспомогательного разряда в ИП-3

Время существования катодного пятна, как правило, зависит от скорости изменения тока разряда [29]. В литературе в основном приведены данные о времени «жизни» катодных пятен первого рода порядка 10...50 мкс. При больших токах на протяжении указанного времени наблюдается появление медленно перемещающихся пятен второго типа, которые вначале сосуществуют с быстроперемещающимися, а затем наблюдаются в отсутствие последних. Время жизни таких пятен слабо зависит от материала термоэмиттера и колеблется от 0,5 до 1,5 мс.

На рис. 4 показан рекомендуемый вид левой части кривой вспомогательного разряда в момент пробоя. Авторы считают, что скорость нарастания тока по кривой, обозначенной на рис. 4, позволит снизить возможный уровень эрозии в момент существования вспомогательного разряда.

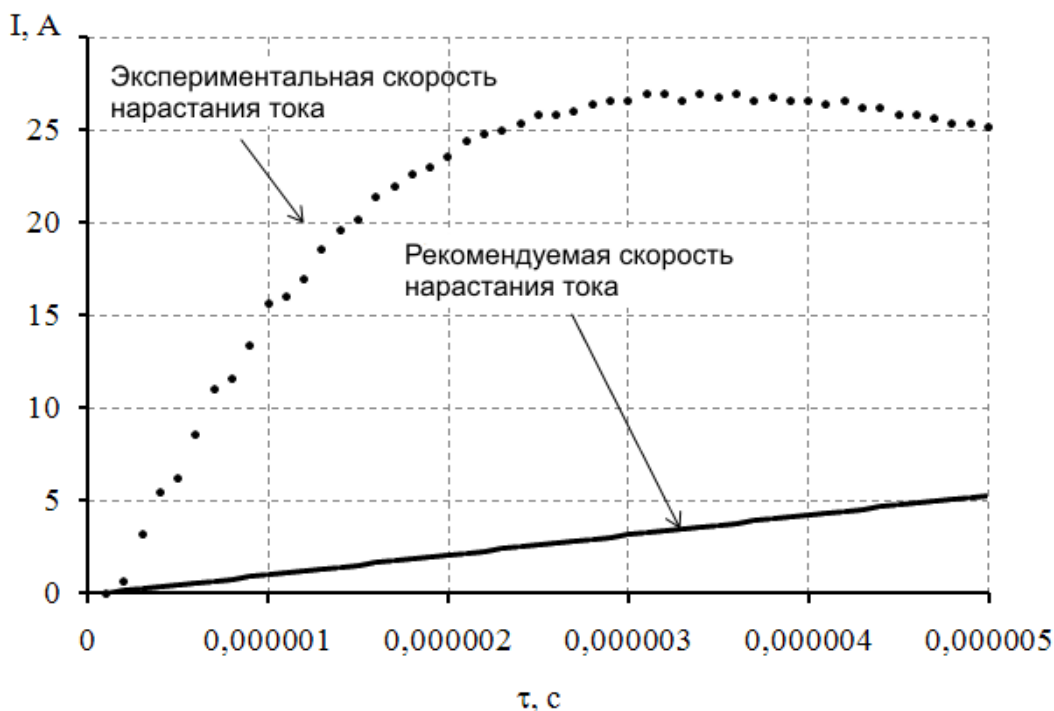


Рис. 4. Зависимости изменения тока вспомогательного искрового разряда (существующая и рекомендуемая)

Сравнивая изменение тока вспомогательного разряда с изменением тока разряда в диапазоне времени  $10^{-9}$  и  $10^{-5}$  с (рис.3.31) можно сделать вывод о том, что время выхода на квазистационарный режим тлеющего разряда составляет не более  $1,5 \cdot 10^{-6}$  с. При этом после «выключения» вспомогательного разряда наблюдается небольшой спад тока основного разряда (см. рис 5.) уже на стадии дугового развития дугового разряда, что отчасти объясняет применение вспомогательного разряда для поддержки тока не только тлеющего, но и дугового основного разряда [12].

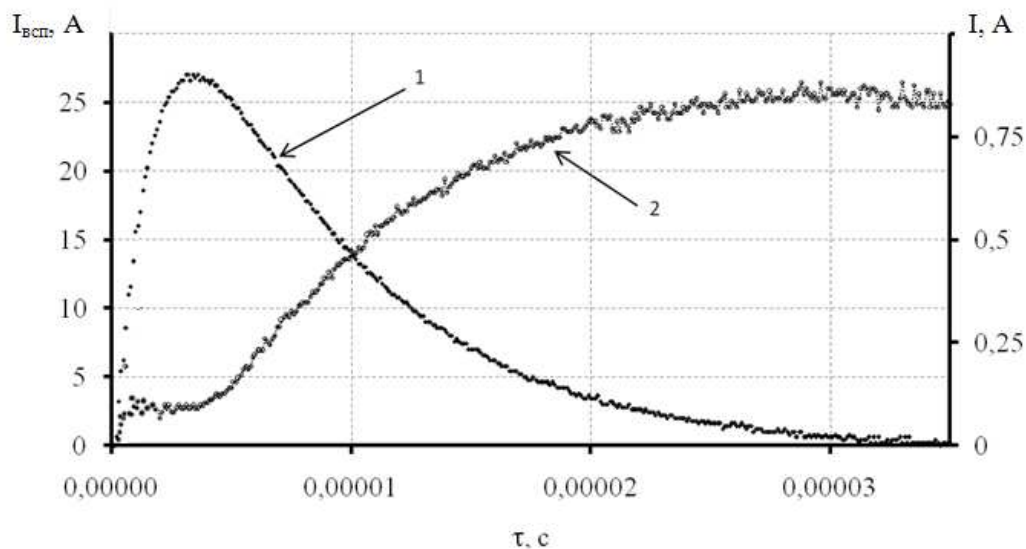


Рис. 5. Изменение тока основного разряда  $I$  и тока вспомогательного разряда  $I_{всп}$ :  
 1 – ток вспомогательного разряда (пробой);  
 2 – ток основного разряда

Для того, чтобы избежать снижения разрядного тока в период после  $3 \cdot 10^{-5}$  с, авторами предлагается продлить существование вспомогательного разряда в стационарном режиме, уже в качестве подготовительного разряда – для ИП-ПР. Так, на рис. 6 показано рекомендуемое изменение пробойного тока между диафрагмой и эмиттером с учетом скорости нарастания тока.

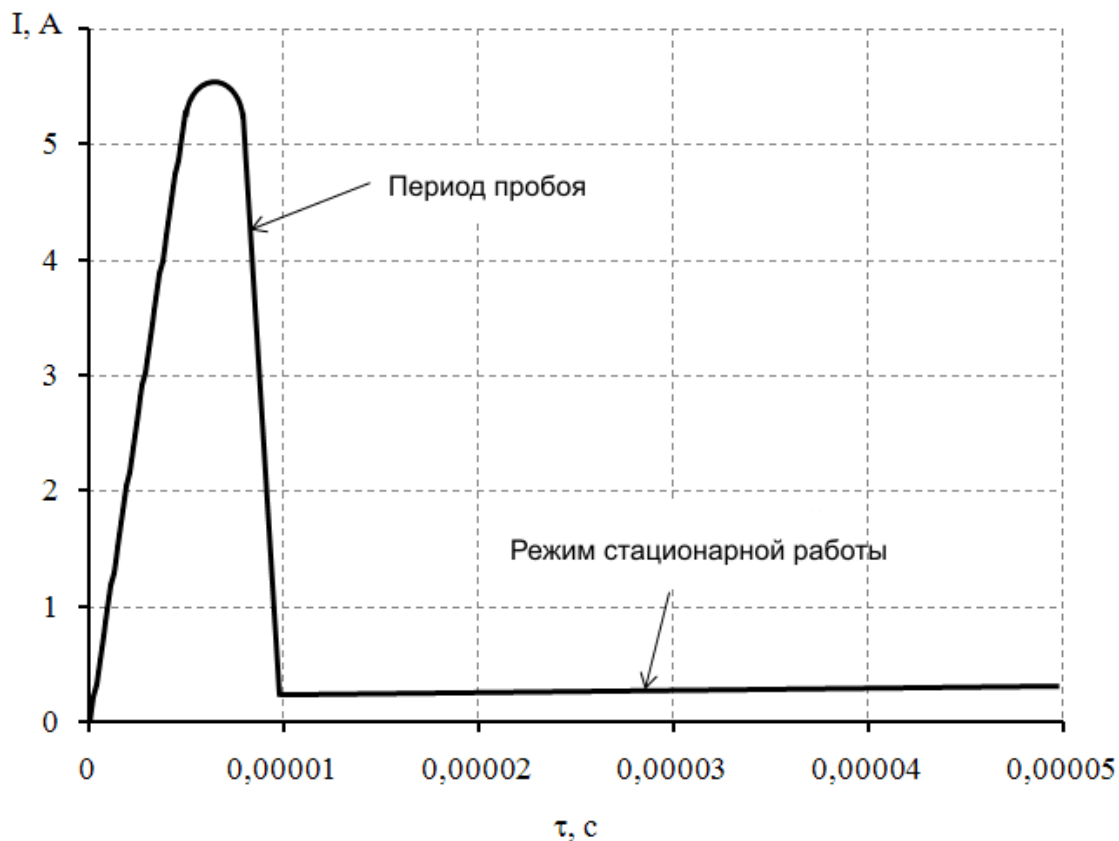


Рис. 6. Характерный вид рекомендуемой зависимости тока вспомогательного разряда в ИП-З и ИП-ПР от времени

### Выводы

Применение предложенной рекомендуемой зависимости тока вспомогательного разряда в ИП-З и ИП-ПР является первым шагом в комплексном управлении запуском самонагреваемых газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов (СГПВК) с внутренним поджигом и уменьшении вероятности возникновения катодных пятен второго рода на поверхности материала термоэмиттера.

### Список литературы

1. Клименко, М.О. Техноэкология [Текст] / М. О. Клименко, И. И. Залесский. – К.: ВЦ «Академия», 2011. – 256 с.
2. Шлейников, В.М. Установки по производству ацетилена из нефти и газа [Текст] / В.М. Шлейников. – М.: Машиностроение, 1965. – 180 с.

3. Алиев, Г. М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов [Текст] / Г. М. Алиев. – М.: Металлургия, 1996. – 544 с.

4. Монсуров, Р. М. Плазмотермическая технология очистки вентиляционного воздуха от органических загрязнителей [Текст] / Р. М. Монсуров, А. С. Басин // Материалы междунар. науч.-техн. семинара «Нетрадиционные технологии в строительстве» (НГАСУ, Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия). – Томск, 1999. – С. 147-148.

5. Страус, В. Промышленная очистка газов [Текст] / В. Страус. – М.: Химия, 1981. – 616 с.

6. Оранский, А. И. Физико-технические основы проектирования полых высокоэмиссионных катодов [Текст] / А. И. Оранский // Авиационно-космическая техника и технология : Тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н. Е. Жуковского за 1997 г. – Х., 1998. – С. 276–281.

7. Любимов, Г. А. Катодное пятно вакуумной дуги [Текст] / Г. А. Любимов, В. И. Раховский // УФН. – 1978. – Т. 125, вып. 4. – С. 665–706.

8. Grubisic. Hollow cathodes as a plasma propulsion device [Text] / Grubisic, N. Angelo Gabriel, B. Stephen // Proc. of the 46-th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition Reston. – USA, 2008. – P. 2008–2082.

9. Оранський, А. І. Вирішення проблеми швидкого та надійного запуску електроракетних двигунів [Текст] / А. І. Оранський // Авиационно-космическая техника и технология : сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 1999. – Вып. 9 : Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 491–494.

10. Michael J. Patterson. Recent Development Activities in Hollow Cathode Technology [Text] / Michael J. Patterson, Matthew T. Domonkos. // Proc. of the 27th Intern. Electric Propulsion Conf., Pasadena, CA, 2001, IEPC-01-270. – P. 15–19.

11. Архипов, Б. А. Опыт создания полых высокоэмиссионных катодов [Текст] / Б. А. Архипов, В. М. Мурашко, А. И. Оранский // Авиационно-космическая техника и технология : тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 1999. – Вып. 10. – С. 360–363.

12. Экспериментальные исследования характеристик быстрого запуска стационарных плазменных двигателей [Текст] / А. И. Корякин, В. М. Мурашко, С. Ю. Нестеренко и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 8 (16). – С. 178–185.

13. Лобов С. А. Формирование самостоятельного тлеющего разряда при безнакальном запуске газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов электрореактивных двигателей / С. А. Лобов, А. И. Оранский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 10 (36). – С. 67–73.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.Н. Кобрин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 14.03.12.



## **До питання управління запуском самонагрівних газорозрядних порожнистих високоемісійних катодів засобами інформаційних технологій в системі підтримки прийняття рішень для плазмового очищення димових газів**

Запропоновано нове застосування самонагрівних газорозрядних порожнистих високоемісійних катодів (СГПВК) з внутрішнім підпалюванням електрореактивних двигунів для задання плазмового очищення димових газів. Наведено основні параметри запуску, схеми СГПВК і системи енергоживлення. Досліджено перший етап запуску СГПВК - в режимі тліючого розряду. Запропоновано нові параметри і рекомендовано нові форми залежностей основних параметрів розряду джерела напруги підпалювання для зменшення ймовірності виникнення плям другого роду на поверхні катода, реалізація яких може мати позитивний вплив на ресурс СГПВК.

**Ключові слова:** газорозрядні порожнисті високоемісійні катоди, електроракетні (електрореактивні) двигуни, газорозрядні процеси, плазмове очищення димових газів.

## **launch control problem of self-heated gas-discharge hollow high-emission cathodes by information technology means in expert support system for a plasma flue gas cleaning**

New application of self-heated gas-discharge hollow high-emission cathodes (SGHHC) with an internal ignition of electricpropulsion for the problem of plasma cleaning of smoke fumes was proposed. The main parameters of start, SGHHC schemes and power supply systems were shown. the first stage of SGHHC launch (the glow discharge mode) was researched. New dependences of main parameters of the ignition voltage source discharge were presented. It could decrease of appearance possibilities of spots of second type of on the cathode surface. Realization of presented recommendations can have a positive impact on the SGHHC lifetime.

**Keywords:** self-heated gas-discharge hollow high-emission cathodes, electricpropulsion, plasma cleaning of smoke fumes.