

УДК 504.3.064.4:628.512

С.А. ЛОБОВ, канд. техн. наук, доцент

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» (НАКУ «ХАИ»), г. Харьков

УМЕНЬШЕНИЕ ВРЕМЕНИ СГЛАЖИВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ МАССОВОГО РАСХОДА ГАЗА ЧЕРЕЗ ПОЛЫЙ КАТОД С ВНУТРЕННИМ ПОДЖИГОМ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОЙ ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Предложена усовершенствованная методика регулирования периода колебаний массового расхода плазмообразующего газа в самонагреваемых газоразрядных полых высокоэmissионных катодах (СГПВК) с внутренним поджигом, используемых для плазменной очистки дымовых газов. Получено новое характеристическое уравнение – зависимость времени сглаживания колебаний плазмообразующего газа СГПВК от основных параметров дополнительных элементов газоподводящего тракта.

Ключевые слова: газоразрядные полые высокоэmissионные катоды, газодинамические процессы, плазменная очистка дымовых газов.

К основным техногенным загрязнителям промышленностью Украины, которые вызывают региональные или глобальные изменения состояния атмосферы и здоровья населения, можно отнести оксиды углерода, диоксид серы, оксиды азота, галогенорганические и угле-

водные соединения, тяжелые металлы, аэрозоли и т.п. Наибольшая часть выбросов приходится на предприятия обрабатывающей промышленности (36 %), производства электроэнергии, газа и нефти (33 %) и добывающей промышленности (25 %) [1].



В последнее время в Украине существует определенная диспропорция между неуклонным наращиванием объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и темпами совершенствования технологий производств. Устаревшие схемы и механизмы очистки не обеспечивают надлежащего уменьшения выбросов как от стационарных, так и от мобильных источников загрязнения. Очевидно, что необходимы внедрение новых технологий и замена производственного оборудования на экологически безопасное и менее энергоемкое.

Одним из перспективных и развивающихся направлений очистки газов от загрязняющих веществ является так называемый метод плазменной очистки газов. В нем, как правило, используют низкотемпературную плазму при относительно низком давлении. Уникальность низкотемпературной слабоионизированной плазмы обусловлена ее значительной термодинамической неравновесностью, которая возникает при создании сильного электрического поля в зоне формирования и существования плазмы.

Газоразрядную плазму для очистки газов успешно применяют в ряде стран (США, Россия, Германия, Япония и др.), используя в качестве источников и генераторов плазмы установки со стримерной короной, плазмохимические реакторы, атмосферные фильтры с тлеющим разрядом, плазменно-дуговые установки по переработке нефтепродуктов и другую технику [2–5].

В работе [6] показано, что использование самонагреваемых газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов (СГПВК) с внутренним поджигом, которые по основным параметрам плазмы, ресурсу и надежности не уступают перечисленным выше плазменным устройствам, может быть мощным инструментом при решении задач плазменной очистки газов.

Однако СГПВК с внутренним поджигом обладает и существенным недостатком – высокой стартовой эрозией материала термоэмиттера, обусловленной спецификой и стадиями формирования рабочего дугового разряда. На безотказность запуска и ресурс СГПВК влияет целый ряд процессов, которые наблюдаются как непосредственно при запуске, так и в режиме стационарной работы. Одни из них являются переходными процессами, другие сопровождаются колебательными явлениями. Например, при запуске СГПВК с холодным эмиттером нормальный дуговой разряд с диффузионной привязкой и требуемыми номинальными стационарными характеристиками сразу не устанавливается. Как показано в работе [7], ему предшествует тлеющий разряд. Между тлеющим и дуговым разрядами, в свою очередь, может иметь место дуговой разряд с катодными пятнами; при переходе с одного режима на другой в плазме

развиваются низкочастотные колебания, в т.ч. и кратковременного падения потенциала.

Более того, было исследовано и показано [8, 9], что запуск СГПВК сопровождается колебаниями целого ряда параметров газоразрядных и газодинамических процессов. Так, в работе [9] эксперименты с СГПВК сопровождались колебаниями расхода плазмообразующего газа через отверстие диафрагмы (до 50 % от стационарного значения).

Доказано [9, 10], что наличие дугового разряда с катодными пятнами и работа с расходами газа ниже номинальных значений существенно снижают ресурс катода. Это связано с тем, что скорость эрозии холодного катода достигает величин 10^{-8} – 10^{-9} кг/Кл, которые примерно на четыре-пять порядков превышают значение данного параметра в стационарном режиме работы (10^{-11} – 10^{-13} кг/Кл). Один из возможных путей минимизации скорости пусковой эрозии СГПВК с внутренним поджигом – максимально быстрое восстановление стационарного расхода плазмообразующего газа.

Таким образом, важной задачей является оптимизация возможных сочетаний геометрических и газодинамических параметров газоподводящего тракта и СГПВК для уменьшения времени стабилизации массового расхода в период запуска катода. Эта задача решалась путем комплексных многофакторных экспериментальных исследований.

В газоподводящий тракт был введен дополнительный ресивер V_2 , который отделялся от СГПВК дополнительным дросселем $d_{2,3}$, а со стороны системы хранения и подачи рабочего тела (СХПРТ) – клапаном. При этом все гидросопротивления газоподводящего тракта и его клапана были собраны в эквивалентное сопротивление $d_{1,2}$ (рис. 1).

Предпосылки к созданию такой модели газоподводящего тракта подробно описаны в работах [11, 12], в которых показано, что соотношение между объемами тракта с эквивалентным гидросопротивлением и объемом конструкции СГПВК существенно влияет на глубину провала и время восстановления стационарного значения массового расхода плазмообразующего газа.

Предлагаемая схема представляет собой три соединенных между собой объема с соответствующими газодинамическими параметрами: газоподводящий тракт 1 – включает в себя объем газоподвода плазмообразующего газа от натекателя СХПРТ до клапана; дополнительный ресивер 2 – объем газоподвода плазмообразующего газа от клапана к добавочному дросселю непосредственно на входе в СГПВК; 3 – рабочая полость катода – объем СГПВК с диафрагмой на выходе.

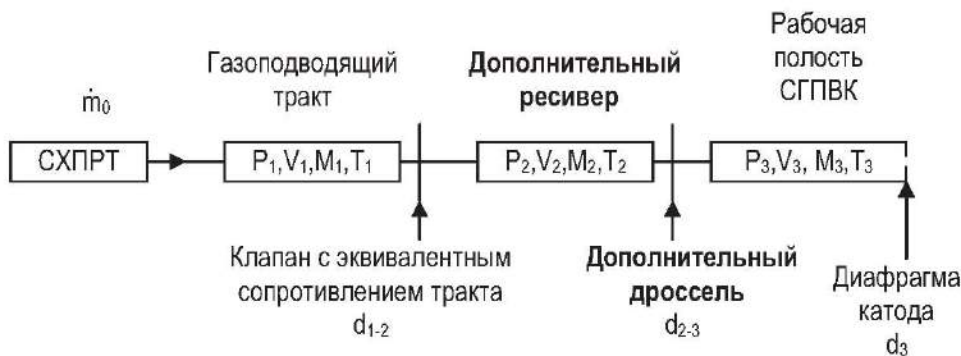


Рисунок 1 – Схема газоподводящего тракта СГПВК с предлагаемыми новыми элементами (выделены жирным шрифтом)

На рис. 1 соответственно обозначены значения давления, температуры, объема и массы газа: P_1, T_1, V_1, M_1 – в первом объеме (т.е. в газоподводящем тракте); P_2, T_2, V_2, M_2 – во втором объеме (т.е. в дополнительном ресивере); P_3, T_3, V_3, M_3 – в третьем объеме (т.е. в рабочей полости СГПВК); \dot{m}_0 – массовый расход плазмообразующего газа. Газоподводящий тракт, дроссель и диафрагма характеризуются диаметрами проходного сечения.

Численные и экспериментальные исследования зависимости времени выхода СГПВК на стационарный режим работы по массовому расходу при его старте от основных газодинамических и геометрических параметров показали, что диаметр отверстия дросселя $d_{2,3}$, давление P_1 и величины объемов V_3, V_2 являются наиболее значимыми параметрами для обеспечения минимального времени выхода СГПВК на стационарный режим работы по массовому расходу при его запуске [11].

Основные экспериментальные исследования были проведены на лабораторной вакуумной установке, предназначенной для отработки, тестирования, проверки и испытаний ЭРД и их узлов. Вакуум создавали в вакуумной камере объемом 3 м³ откачной системой, включающей в себя два форвакуумных насоса ВН-6 производительностью 160 л/с и два диффузионных паромасляных насоса ВА-8-4 производительностью 2·10³ л/с. Предельный вакуум составлял 2·10⁻⁵ Торр. Изменение давления в вакуумной камере контролировали с помощью ионизационно-термопарного вакуумметра ВИТ-3.

В работах [13–15] показано, что измерения динамического вакуума в вакуумной камере такого типа позволяют определить период стабилизации массового расхода при запуске СГПВК. Аналоговый сигнал изменения динамического вакуума, фиксируемый на ВИТ-3, передается на вольтметр В7-16, который служит аналого-цифровым преобразователем (АЦП), сигнал с которого поступает на устройство ввода INPUT REGISTER крейта «КАМАК», которое, в свою очередь, обеспечивает считывание цифровой информации ПК IBM PC AT 286/287 [11].

Математически зависимость давления в вакуумной камере от напряжения на ВИТ-3 можно выразить как $P=0,4852 \times U-0,9971$ (с величиной достоверности аппроксимации $R^2=0,9986$).

Лабораторная СХПРТ в экспериментах по изучению колебаний массового расхода рабочего тела управлялась с помощью лабораторной платы управления, адаптированной под крейт «КАМАК», которая обеспечивала массовый расход рабочего тела для СГПВК в диапазоне от 0,01 до 2 мг/с с точностью не хуже 5 % от номинальной [14–16].

Эксперимент, физическое моделирование, комплексные экспериментальные исследования, а также сравнение численных и экспериментальных данных проводили с использованием СГПВК, разработанного в МНТЦ КЭД «ХАИ» (рис. 2). Рабочие параметры СГПВК в ходе эксперимента – массовый расход рабочего тела (Xe) $\dot{m}=0,5$ мг/с, разрядные характеристики СГПВК: ток разряда – 10 А, напряжение разряда – 30 В.



Рисунок 2 – СГПВК, на котором проводились эксперименты по исследованию восстановления массового расхода плазмообразующего газа

На основе расчетно-оценочных данных зависимости времени восстановления стационарного значения массового расхода плазмообразующего газа от перечисленных выше параметров СХПРТ [11, 12] была построена характеристическая зависимость второй степени по результатам активного факторного эксперимента типа 2³ для установленной экстремальной области с учетом уже выбранных наиболее значимых независимых пара-



метров СХПРТ – давления в тракте P_1 и давления добавленного дросселя $d_{2,3}$. Третьим независимым параметром варьирования было выбрано значение объема добавочного ресивера V_2 .

С использованием полученных экспериментальных данных и расчетного алгоритма [17] были определены значения коэффициентов регрессии для характеристического уравнения

$$t(X_1, X_2, X_3) = 47,2789 - 9,32593 \cdot X_1 + 2,02795 \cdot X_2 + 2,65418 \cdot X_3 - 7,375 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,375 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,375 \cdot X_2 \cdot X_3 - 10,0638 \cdot X_1^2 + 9,72556 \cdot X_2^2 - 3,12883 \cdot X_3^2.$$

Оценка воспроизводимости опытов для рассматриваемого случая составляла: $G = 0,529 < G_{(0,05,9,1)} = 0,6385$, т.е. ошибка эксперимента попадает в рамки 5 %-го уровня значимости. Проверка полученной зависимости с помощью критерия Фишера показала, что точность совпадения данных – не хуже 5 %: $F = 0,499873 \leq 6,3883$. Таким образом, полученное уравнение адекватно описывает зависимость времени выхода СГПВК на стационарный режим по массовому расходу плазмообразующего газа t от давления в объеме V_1 , диаметра отверстия дополнительного дросселя $d_{2,3}$ и объема добавленного ресивера V_2 в предложенном диапазоне варьирования. Для наглядности эту зависимость удобно представить в виде линий уровня для различных значений давления, объема и диаметра отверстия дросселя.

На рис. 3–5 показаны изолинии зависимости t как функции двух переменных – давления P_1 и диаметра $d_{2,3}$ – при различных значениях объемов V_2 . На всех представленных зависимостях ярко выражен минимум характеристики. Он составляет приблизительно 45–50 с – для случаев, когда объем V_2 принимает значения 296 и 592 мм³ соответственно.

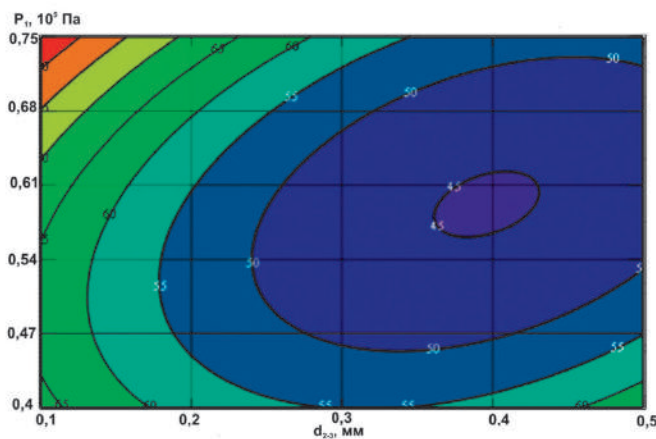


Рисунок 3 – Изолинии зависимости t как функции двух переменных – давления P_1 и диаметра дросселя $d_{2,3}$ при $V_2=296$ мм³

Для объема V_2 , соответствующего своему максимальному значению в исследуемом диапазоне, минимальное время составило 40 с. Как и в предыдущих исследованиях [11], эта область находится в диапазоне диаметров $d_{2,3}$ от 0,25 мм и выше (непосредственно центр области минимума соответствует диаметру ~0,4 мм).

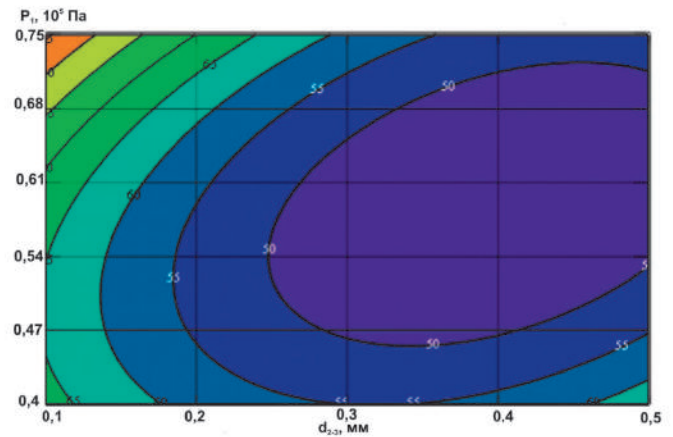


Рисунок 4 – Изолинии зависимости t как функции двух переменных – давления P_1 и диаметра дросселя $d_{2,3}$ при $V_2=592$ мм³

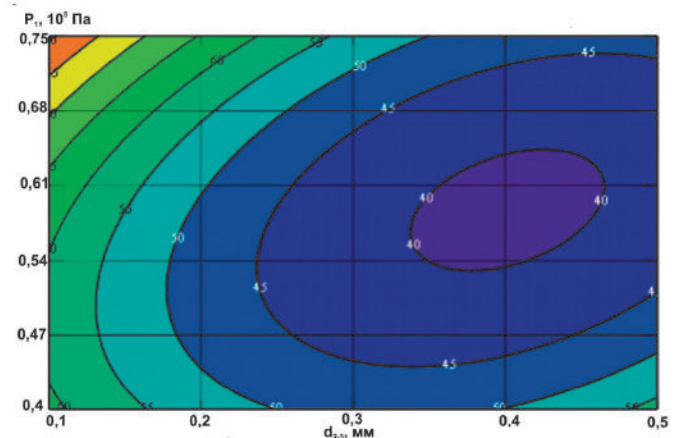


Рисунок 5 – Изолинии зависимости t как функции двух переменных – давления P_1 и диаметра дросселя $d_{2,3}$ при $V_2=888$ мм³

При увеличении объема ресивера V_2 область минимальных значений времени выхода СГПВК на стационарный режим по массовому расходу существенно снижается, но одновременно снижается и абсолютное значение минимума – до 40 с (для $V_2=888$ м³).

Таким образом, в пределах исследуемых диапазонов установлены реально контролируемые временные рамки выхода СГПВК на стационарный режим работы по массовому расходу плазмообразующего газа.

ВЫВОДЫ

В результате экспериментальных исследований и оптимизации геометрических и газодинамических параметров газоподводящего тракта удалось уменьшить время существования «провала» массового расхода плазмообразующего газа при запуске самонагревного газоразрядного полого высокоэмиссионного катода с внутренним поджигом для решения задачи плазменной очистки дымовых газов.

Оценки показывают, что сокращение времени стабилизации массового расхода плазмообразующего газа со 100 до 40 с (в соответствии с [13, 18]) позволит уменьшить величину пусковой эрозии более чем на 70 %.

Применение инновационных технологий, оптимизация и улучшение процесса плазменной очистки газов позволит расширить область использования газоплазменного метода на различных источниках загрязнения атмосферного воздуха как в Украине, так и за ее пределами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клименко, М.О. Техноэкология / М.О. Клименко, И.И. Залесский. – К.: ВЦ Академия, 2011. – 256 с.
2. Шлейников, В.М. Установки по производству ацетиленов из нефти и газа / В.М. Шлейников. – М.: Машиностроение, 1965. – 180 с.
3. Алиев, Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов / Г.М. Алиев. – М.: Металлургия, 1896. – 544 с.
4. Монсуров, Р.М. Плазмотермическая технология очистки вентиляционного воздуха от органических загрязнителей / 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 / В. Страус. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
6. Лобов, С.А. К вопросу управления запуском самонагревных газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов средствами информационных технологий в системе поддержки принятия решений для плазменной очистки дымовых газов / С.А. Лобов, Н.В. Кузнецова, А.И. Оранский // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2012. – Вып. 54. – С. 139–147.
7. Оранский, А.И. Физико-технические основы проектирования полых высокоэмиссионных катодов / 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.
8. Низкочастотные колебания и неустойчивости плазмы дугового разряда с полым катодом / Г.К. Бахмет, А.И. Оранский, В.М. Рашкован, Ф.М. Трубочанинов // Источники низкотемпературной плазмы: темат. сб. науч. тр. / Харьк. авиац. ин-т. – Х., 1977. – Вып. 2. – С. 75–84.
9. Koshelev, N.N. The peculiarities of hollow cathodes erosion at non-incandescent switching on / N.N. Koshelev, A.V. Loya, A.I. Oransky // Proc. of the 24th Intern. Electric Propulsion Conf. IEPS-95-209, Moscow (Russia). – M., 1995. – P. 1413–1417.
10. Кошелев, Н.Н. Особенности эрозии полых катодов безнакального запуска / Н.Н. Кошелев, А.В. Лоян, А.И. Оранский // Тезисы докладов юбилейной конференции ЭРД, посвященной 100-летию Л.А. Квасникова. – М., 1991. – С. 50–55.
11. Лобов, С.А. Влияние параметров системы хранения и подачи рабочего тела на время сглаживания колебаний массового расхода через полый катод при запуске стационарного плазменного двигателя / С.А. Лобов, А.В. Лоян, А.И. Оранский // Авіаційно-космічна техніка і технологія: зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – Х., 2002. – Вип. 31. – С. 260–264.
12. Пат. 59130 Україна, МПК H01J37/06, F03N1/00, H05H1/00. Плазмовий катод і спосіб його запуску / Лобов С.О., Лоян А.В., Оранський А.І.; заявник і патентоволодієць Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – 2003021224; заявл. 11.02.03; опубл. 15.08.03, Бюл. № 8. – 4 с.: іл.
13. Koshelev, N.N. The peculiarities of hollow cathodes erosion at non-incandescent switching on / N.N. Koshelev, A.V. Loya, A.I. Oransky // Proc. of the 24th Intern. Electric Propulsion Conf. IEPS-95-209, Moscow (Russia). – M., 1995. – P. 1413–1417.
14. Кошелев, Н.Н. Исследование прирабочих, пусковых и переходных тепловых режимов безнакального полого катода для электроракетной двигательной установки / Н.Н. Кошелев, С.А. Лобов, А.В. Лоян // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 1998. – Вып. 5. – С. 538–542.
15. Лобов, С.А. Исследование динамики запуска плазменного нейтрализатора электрического заряда поверхностей космического летательного аппарата / С.А. Лобов, А.В. Лоян, А.И. Оранский // Авіаційно-космічна техніка і технологія: зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України; Держ. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського «ХАІ». – Х., 1999. – Вип. 14. – С. 47–50.
16. Лобов, С.А. Исследование переходных газовых процессов, сопровождающих запуск катода электрореактивной двигательной установки / С.А. Лобов // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. / М-во образования



- Украины ; Гос. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 1999. – Вып. 9. – С. 485–487.
17. **Винарский, М.С.** Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. – К. : Техника, 1975. – 167 с.
18. **Оранский, А.И.** Газоразрядные полые высокоэмиссионные катоды : моногр. : в 4 т. Т. 3 / А.И. Оранский, А.В. Лоян, С.А. Лобов ; под ред. А.И. Оранского. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2011. – 208 с.

Поступила в редакцию 13.11.2012

Запропоновано удосконалити методику регулювання періоду коливань масової витрати плазмоутворюючого газу в самонагрівних газорозрядних порожнистих високоемісійних катодах (СГПВК) з внутрішнім підпалом для плазмового очищення димових газів. Отримано нове характеристичне рівняння – залежність часу згладжування коливань плазмоутворюючого газу СГПВК від основних параметрів додаткових елементів тракту для підводу газу.

The improved technique of fluctuation period regulation of plasma gas mass rate in self-heating gas-discharge hollow high-emission cathodes (SGHHC) with internal ignition for problem of plasma cleaning of flue gases is presented. The new characteristic equation - the dependence of fluctuation smoothing of plasma gas in SGHHC from main parameters of additional elements of gas supply track was derived.