

УДК 519.63:533.273

**В.С. КРИВЦОВ, С.И. ПЛАНКОВСКИЙ, Е.В. ЦЕГЕЛЬНИК, Е.К. ОСТРОВСКИЙ,  
А.А. ТАРАН, А.В. ЛОЯН***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***СОСТАВ ГАЗА В ПЛАЗМОТРОНЕ С ЛАМИНАРНЫМ ПОТОКОМ  
ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ИНЕРТНОГО ГАЗА**

Представлены результаты математического моделирования течения смеси газов (воздух + аргон) в трёх моделях плазмотронов. Изучены поля скоростей и парциальных давлений. Установлены критерии оптимизации геометрии канала плазмотрона, исходя из полученных данных по отравлению катода атмосферным воздухом.

**плазмотрон, полый катод, электрическая дуга, парциальное давление, термоэмиссия, моделирование, отравление**

**Введение**

**Постановка задачи и ее связь с научно-практическими задачами.** Применение термоэмиссионных материалов на основе сложных оксидов щелочноземельных металлов в полых катодах дуговых плазмотронов, работающих с выбросом нагретого газа и плазмы в атмосферу, требует защиты эмитирующей электроны поверхности катода от отравления активными газами. К активным, прежде всего, следует отнести все кислородсодержащие газы не только в атмосфере воздуха, но и выделяющиеся с нагретых элементов конструкции плазмотрона при его работе. Известно, что в состав сухого атмосферного воздуха входят  $O_2$  (23,1 масс. %);  $N_2$  (75,5 масс. %);  $CO_2$  (0,046 масс. %) и др. В воздухе также могут находиться пары  $H_2O$  (до 1,3 масс. %).

Возможность работы термоэмиссионных полых катодов с отбором больших электронных токов и сроком службы несколько тысяч часов определяется как выбором материала катода, так и степенью его защиты от воздействия атмосферного воздуха.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализ источников поступления отравляющих газов в область полого катода в плазмотроне показал, что основными из них являются [1]:

– воздух, оставшийся в области катода после

предварительной продувки плазмотрона химически чистым инертным газом перед зажиганием электрической дуги;

– примеси  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  и  $N_2$ , поступающие в плазмотрон в составе инертного газа Ar технической очистки;

– газовыделение с нагретых до высокой температуры термоэлектронного катода и элементов конструкции плазмотрона;

– диффузия в область полого катода атмосферного воздуха через встречный поток инертного газа.

Для защиты термоэмиссионных катодов от отравления атмосферным воздухом используется встречный поток защитного инертного газа Ar. Иногда защитный газ одновременно является и плазмообразующим, поэтому газодинамические характеристики такого потока, прежде всего, будут определять парциальное давление атмосферных газов в области катода, а, следовательно, и степень отравления катода.

**Цель работы:** экспериментально определить для выбранного материала катода предельно допустимое парциальное давление по воздуху ( $P_{np}$ ) в смеси газов (воздух + Ar), допускающее работу термоэлектронного катода без существенного его перегрева.

На основании численного эксперимента нестационарной математической модели газодинамических процессов смешения атмосферного воздуха и Ar в ламинарном потоке газа провести оптимизацию проточной части плазмотрона с целью исключения застойных зон накопления атмосферных газов, сокращения времени продувки аргоном газовых каналов перед зажиганием электрической дуги и определение оптимальных расходов защитного газа Ar.

## Результаты исследования и их обсуждение

### 1. Отравляемость термоэмиссионного катода

Исследования, проведенные в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» в области разработки пресованных и пропитанных термоэмиссионных катодов на основе сложных оксидов бария  $Me_xBa_yMe_zO_v$ , показали, что такие материалы являются эффективными термоэмиттерами с малой работой выхода электрона  $\phi = 2,2 \div 2,4$  эВ в широком диапазоне температур  $T = 1200 \div 2000$  К. Так, например, при температуре  $T = 2000$  К катод обеспечивает токоотбор электронов в вакууме с плотностью тока  $j = 230$  А/см<sup>2</sup> в импульсном режиме работы [2, 3].

Высокие температуры плавления таких соединений,  $T_{пл} = 2860 \div 2890$  К, по сравнению с температурами плавления широко используемых в электронной технике материалов катодов:

- трехбариевым алюминатом –  $T_{пл} = 1620$  К;
- алюмосиликатами –  $T_{пл} = 1820$  К;
- вольфраматами –  $T_{пл} = 1900$  К,

открывают большие перспективы использования  $Me_xBa_yMe_zO_v$  в качестве катодов дуговых плазмотронов, где рабочая температура катода в контакте с электрической дугой достигает 2000 К и выше.

Возможности использования сложных оксидов в плазмотронах, работающих с выбросом нагретого газа и плазмы в атмосферу, потребовали проведения

дополнительных исследований их отравляемости при напуске атмосферного воздуха на горячий эмиттирующий электроны катод. Характеристики отравления даются обычно отношением  $j/j_0$ , где  $j$  и  $j_0$  – плотности токов эмиссии отравленного и неотравленного катода.

На рис. 1 представлены результаты измерений степени отравляемости  $j/j_0$  в зависимости от давления воздуха в вакуумной камере для образца катода с оптимальным содержанием компонентов. Измерения выполнены для разных температур катода. Как видно, устойчивость катодов к воздействию атмосферы с ростом температуры катода возрастает.

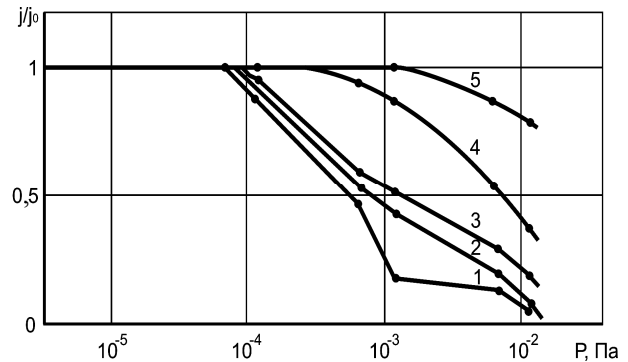


Рис. 1. Изменение термоэмиссионного тока катода оптимального состава от давления при напуске атмосферного воздуха  $T$  К: 1 – 1330; 2 – 1450; 3 – 1550; 4 – 1680; 5 – 1800

Зависимость  $j/j_0 = f(P)$  позволяет установить предельное значение парциального давления атмосферных газов в смеси (воздух + Ar) в области термокатада плазмотрона.

Для каждой температуры катода существует пороговое значение давления воздуха  $P_{np}$ , выше которого наступает отравление катода. Ориентируясь приблизительно на рабочую температуру катода 1800 К, по кривой 5 на рис. 1 определим предельное парциальное давление по воздуху:  $P_{np} = 1 \cdot 10^{-3}$  Па. При температуре катода 1900 К  $P_{np}$  отодвигается в сторону более высокого давления, до  $10^{-2}$  Па.

**2. Математическая модель газодинамических процессов**

Возможность технической реализации условий, когда парциальное давление по воздуху вблизи катода меньше предельно допустимого –  $P_{np}$ , требует исследования газодинамических параметров потока. Учитывая сложность конструкции плазмотрона, такие данные могут быть получены только в рамках математического моделирования задачи. На этапе проектирования это более предпочтительно с точки зрения скорости и стоимости исследований.

Трехмерная модель плазмотрона была разработана в системе SolidWorks 2003. С использованием встроенного алгоритма программы CosmosFlo-Works 2003 создана расчетная сетка проточной части плазмотрона. В основе математической модели лежат нестационарные уравнения в трехмерной постановке: неразрывности (1), движения вязкой сжимаемой жидкости (Навье-Стокса) (2) и уравнение энергии (3):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_H, \quad (3)$$

где  $P$  – давление;  $u$  – скорость;  $\rho$  – плотность;  $S_i$  – внешняя сила, приложенная к единице объема;  $E$  – полная энергия на единицу массы;  $Q_H$  – объемный источник тепловыделения;  $\tau_{ik}$  – тензор вязкостных напряжений;  $q_k$  – диффузионный тепловой поток.

Для описания развитого турбулентного течения используются уравнения Рейнольдса осредненного турбулентного движения. Система дифференциальных уравнений замыкается уравнением состояния идеального газа,  $k-\varepsilon$  моделью турбулентности, зависимостями коэффициентов кинематической

вязкости и теплопроводности от температуры. Полученная система уравнений решается методом конечных объемов.

**3. Газодинамические характеристики плазмотронов**

Перед включением полость плазмотрона заполнена атмосферным воздухом, поэтому зажиганию дуги предшествует этап продувки ее аргоном для удаления атмосферных газов. Задавая начальные условия в плазмотроне:

$$- P_{возд} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$- T = 293 \text{ К};$$

$$- \text{расход химически чистого Ar } M = 4 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$$

и решая нестационарную задачу смешения газов (воздух + Ar), рассчитаны поля скоростей для нескольких конструкций плазмотронов, показанных на рис. 2.

Как следует из рис. 2, а в первой конструкции внутри полого катода 2 со сплошным дном полностью отсутствует движение Ar:  $V_{z0} = 0$  (рис. 2, кривая а). Внутри полости катода образуется так называемый атмосферный газовый «карман».

На второй и третьей конструкциях удалось провести оптимизацию течения газа в каналах. Для ликвидации застойной зоны дно полого катода второй конструкции выполнено с четырьмя секторными прорезями (плазмотрон на рис. 2, б) и четырьмя отверстиями диаметром  $d = 6$  мм (плазмотрон на рис. 2, в).

Как следует из графиков скоростей, на том же рис. 2 в моделях (б) и (в) удается получить достаточно большие скорости газового потока через полый катод, что гарантирует быструю очистку катодной полости от атмосферных газов на этапе предварительной продувки перед зажиганием дуги в плазмотроне.

Поле скоростей, представленное на рис. 2, б, в и картины линий тока на рис. 3, б, в указывают на ламинарный характер течения газа, как в каналах

плазмотронов, так и в полости катода. В ламинарном вязком потоке газа в цилиндрическом канале продольная скорость газа зависит от радиуса  $r$  и описывается параболической зависимостью

$$V_{zr} = \frac{2M\Re T}{\rho\mu R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (4)$$

где  $M$  – массовый расход аргона;  $\Re$  – универсаль-

ная газовая постоянная;  $T$  – температура газа;  $\rho$  – плотность аргона;  $\mu$  – молярная масса аргона.

При этом продольная скорость стремится к нулю вблизи стенок канала 3, образуя ламинарный пограничный заторможенный слой. Это подтверждает светлый фон на рис. 2, а, б, в.

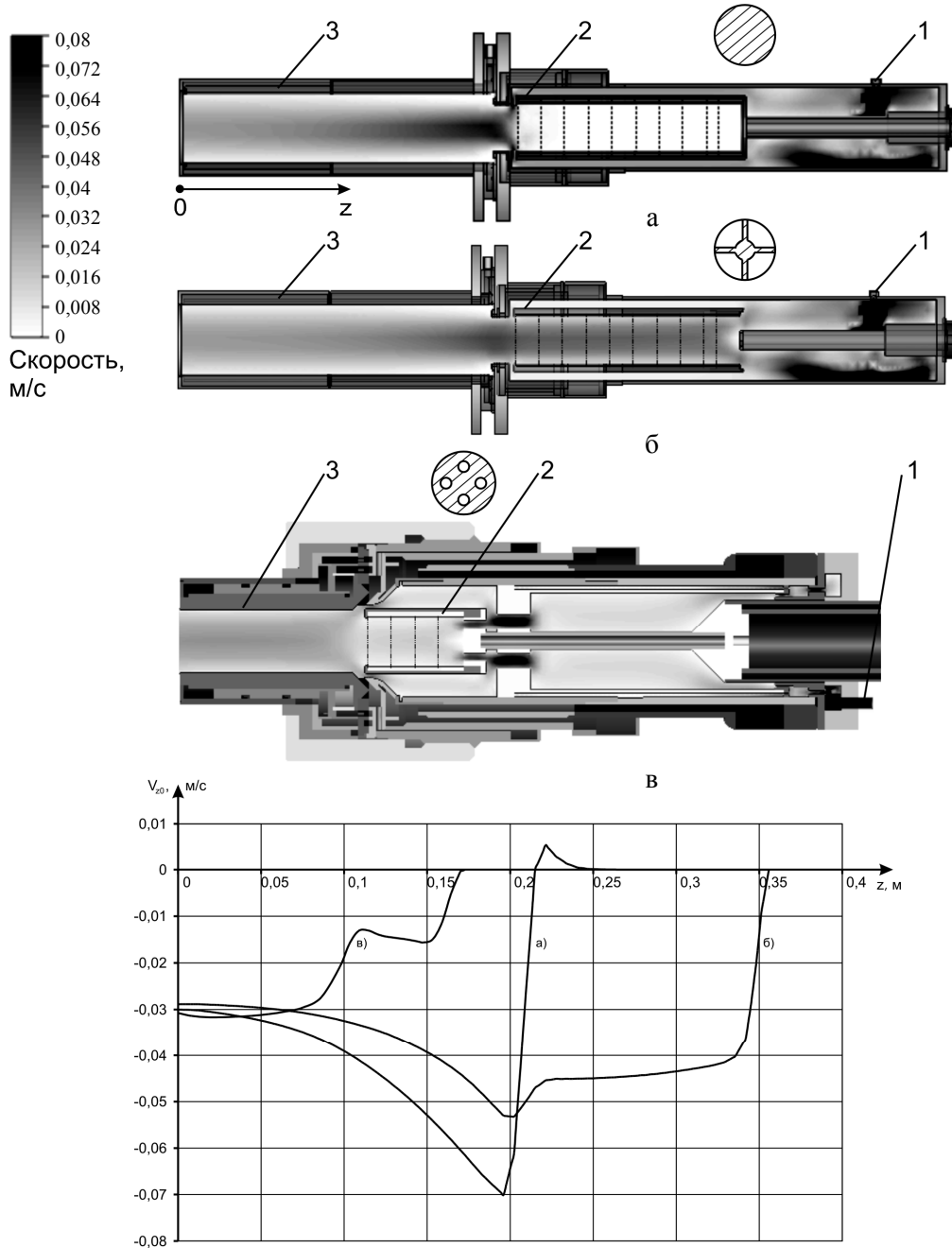


Рис. 2. Распределение продольной скорости газа вдоль оси плазмотрона (массовый расход аргона  $M = 4 \cdot 10^{-5}$  кг/с; температура газа  $T = 300$  К):  
1 – ввод Ar, 2 – полый катод, 3 – канал плазмотрона

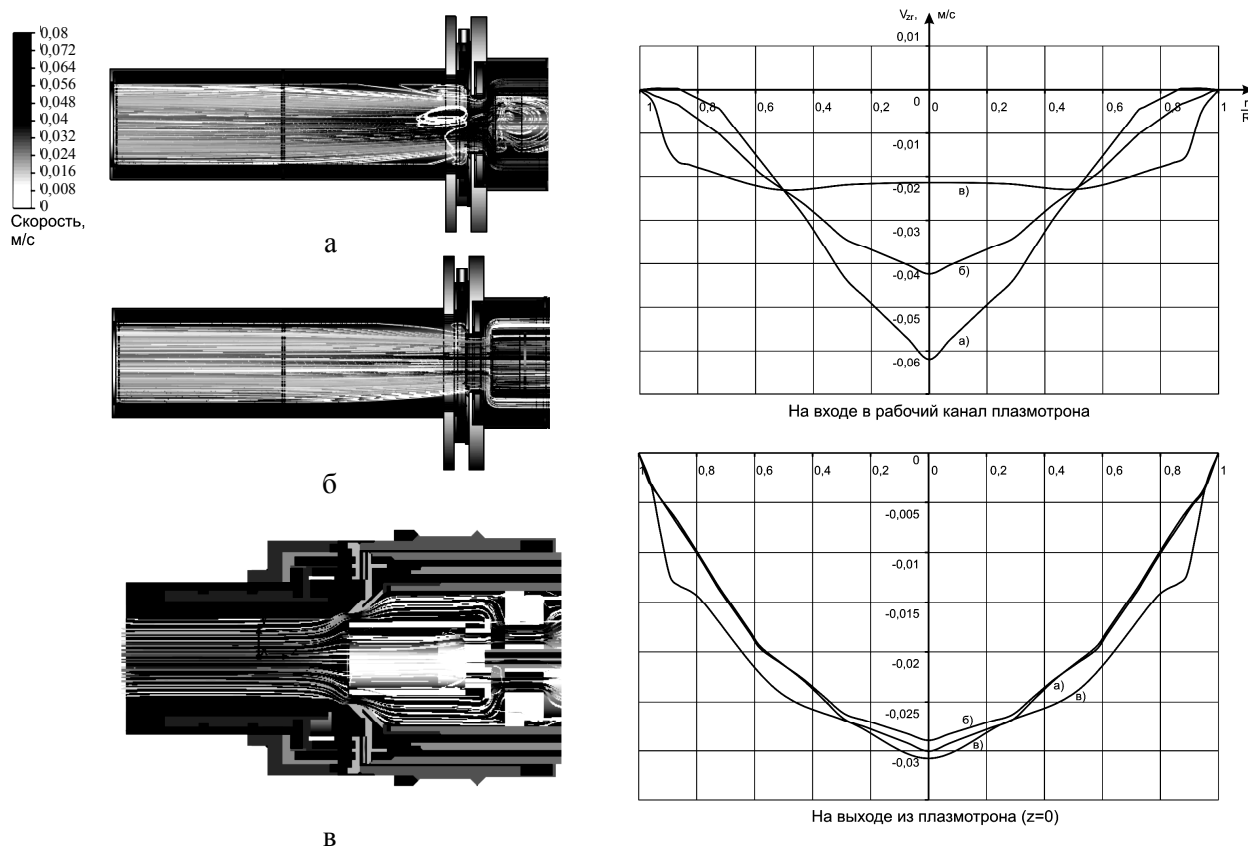


Рис. 3. Картина линий тока одинаковых скоростей и распределение продольных скоростей по радиусу канала плазматрона ( $M = 4 \cdot 10^{-5}$  кг/с;  $T = 300$  К)

Распределение скоростей  $V_{zr}$  по радиусу каналов на выходе плазматронов ( $z = 0$ ) достаточно хорошо подчиняется параболическому закону (4), как это следует из графиков на рис. 3, а, б, в. Этого нельзя сказать о распределении скоростей по радиусу  $r$  для сечений на входе в каналы плазматронов (графики на рис. 3). Для первой (а) конструкции имеет место широкий пограничный заторможенный слой у стенок канала. Из-за турбулентных возмущений на входе канала имеет место обратный поток Ar, хотя и с небольшими скоростями, что ухудшает защиту катода от атмосферных газов. Лучшие газодинамические характеристики имеет плазматрон конструкции 3 (в), для которого ширина пограничного слоя минимальна по всей длине канала плазматрона (графики на рис. 3).

#### 4. Остаточное парциальное давление воздуха

Длительность предварительной продувки Ar не может быть большой. Это связано с высокой стои-

мостью химически чистого Ar и, как показало математическое моделирование, зависит от конструкции газового канала плазматрона.

Нестационарная математическая модель течения двухкомпонентной смеси (воздух + Ar) позволяет рассчитать также и поле массовых концентраций воздуха вдоль канала плазматрона для различных моментов времени продувки. Это позволяет построить зависимость осредненного по сечению парциального давления воздуха от времени продувки для полости катода (рис. 4).

В модели плазматрона (а), где Ar не продувает полый катод, к концу цикла продувки ( $t = 240$  с) парциальное давление воздуха превышает 5000 Па (рис. 4, кривая а). Это вызвано наличием газового «кармана» атмосферного воздуха в полости катода. Понятно, что включение электрической дуги с последующим нагревом термоэлектронного катода приведет к его полному отравлению.

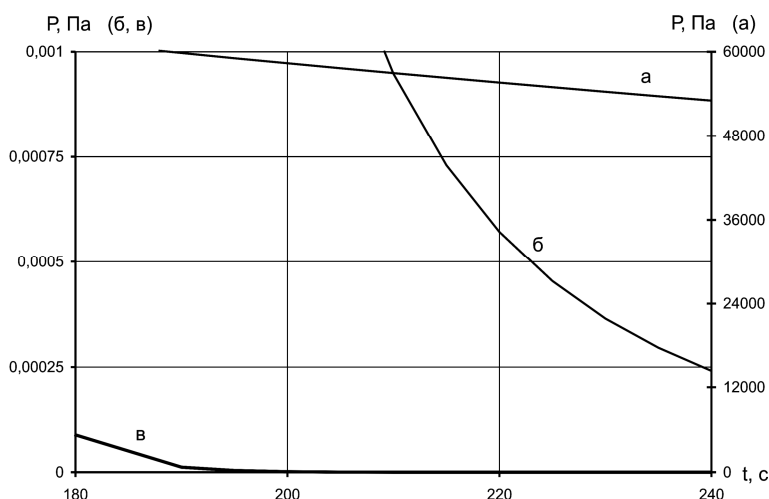


Рис. 4. Зависимость осредненного парциального давления воздуха от времени продувки в середине полого катода:  
а – модель плазмотрона (а); б – модель плазмотрона (б);  
в – модель плазмотрона (в)

В модели плазмотрона (б) полый катод продувается Ag через четыре секторные прорези и к моменту времени  $t = 240$  с остаточное парциальное давление по воздуху ниже, чем предельно допустимое  $P_{np} = 1 \cdot 10^{-3}$  Па (рис. 4, кривая б).

Значительно сократить время предварительной продувки плазмотрона Ag удалось в третьей конструкции (в), где остаточное парциальное давление воздуха, равное  $P_{np}$ , получено через  $t = 110$  с (рис. 4, кривая в).

## Заключение

### Перспективы дальнейших исследований.

Предлагаемые в работе критерии оптимизации газодинамических параметров плазмотронов и разработанный метод математического моделирования позволяют значительно сократить время проведения дорогостоящих экспериментальных исследований при проектировании плазмотронов с термоэлектронными катодами.

**Выводы.** 1. Проведено математическое моделирование течения двухкомпонентной смеси газов (воздух + Ag) в плазмотронах на этапе продувки аргоном перед зажиганием дуги с целью оптимизации

его проточной части.

2. Изучен ламинарный режим течения газа в трех конструкциях плазмотронов. Определены области возмущений, приводящие к частичной турбулизации потока.

3. Получено распределение дольных скоростей по радиусу напла плазмотронов.

4. Рассчитанные зависимости остаточного парциального давления в области термоэмиссионного катода позволяют оптимизировать газовый канал плазмотрона для защиты термоэмиссионного катода от отравления атмосферным воздухом.

## Литература

1. Кривцов В.С., Планковский С.И., Цегельник Е.В. Нестационарная математическая модель для описания многомерных теплогидравлических эффектов в камере плазмотрона при предстартовой продувке // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. трудов. – 2004. – Вып. 24. – С. 126 – 130.
2. Патент № 51550 від 11.06.2002 / А.О. Таран, Є.К. Островський, С.С. Орданьян. – Надруков. 15.11.2002. – Бюл. № 11.
3. Таран А.А., Островский Е.К., Комозынский П.А., Кислицын А.П., Орданьян С.С. Получение, излучательные характеристики и особенности импульсной термоэмиссии катодов на основе гафн-та бария с вольфрамом // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 6 (14). – С. 5 – 11.

Поступила в редакцию 11.05.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.А. Крашаница, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.