

УДК 621. 629.3; 669.54. 793

**Дидманидзе О.Н. Метод наплавки порошковых материалов с применением  
плазмотрона для наплавки износостойких материалов**  
Method of surfacing powder materials using a plasma torch for surfacing wear-resistant materials

**Дидманидзе О.Н.**

д.т.н., академик РАН, профессор кафедры тракторов и автомобилей.  
Российский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева.  
Didmanidze O. N.

doctor of technical Sciences, academician of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Department of tractors and automobiles. Russian state agrarian University named after K. A. Timiryazev.

*Аннотация.* В статье приведены некоторые результаты расчетов по эффективности использования плазмотрона для наплавки износостойких, фрикционных и других специальных покрытий на поверхность деталей методом наплавки порошковых материалов, позволяющего более рационально и полноценно использовать имеющейся в организации техническое и технологическое оборудование.

*Ключевые слова:* износостойкость; фрикцион; поверхность; механизация.

*Abstract.* the article presents some results of calculations on the effectiveness of using a plasma torch for surfacing wear-resistant, friction and other special coatings on the surface of parts by surfacing powder materials, which allows more rational and full use of the technical and technological equipment available in the organization.

*Keywords:* wear resistance; friction; surface; mechanization.

---

**Рецензент:** Сагитов Рамиль Фаргатович, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе в ООО «Научно-исследовательский и проектный институт экологических проблем», г. Оренбург

Бурное развитие электроплазменных процессов предъявляет и плазматронам новые высокие требования. Для каждого технологического процесса применима одна вполне определенная конструкция плазмотрона, дающая высокий технико-экономический эффект.

Существующие плазмтроны имеют определенные преимущества и недостатки. Основным недостатком является выход из строя плазмообразующего сопла из-за нарушения наплавки; замыкания плазмотрона на деталь. Так же подгорание или большая эрозия вольфрамового электрода. Поэтому весьма перспективным являются плазмтроны с распределенной дугой, в которых ресурс работы сопла анода значительно увеличивается, при одновременном повышении мощности плазменной струи, при умеренных токах. В таких плазмтронах, кроме того, удается фиксировать длину дуги при помощи межэлектродных выставок. Эти плазмтроны обладают высокой энергетической эффективностью преобразования электрической энергии в тепловую и возможностью получения максимального КПД технологического процесса. Разработка плазмтрона позволит расширить номенклатуру восстанавливаемых деталей и более полно использовать возможности плазменной установки.

**а) Устройство плазмтрона и принцип работы**

Предлагаемый плазмтрон предназначен для наплавки износостойких, фрикционных и других специальных покрытий на поверхность деталей методом наплавки порошковых материалов. Плазмтрон (рисунок 1) представляет собой конструкцию из двух изолированных узлов катодный 1 (верхний) и анодный 2 (нижний), вмонтированные в рукоятку 3. Дуговой канал этих плазмтронов

образован катодом 4 с вольфрамовой вставкой 5, заделанный в обойму, формирующим соплом 6, секциями межэлектродной вставки 7 и медным анодом 8. Токопровод осуществляется с помощью проводов 9 к каждой межэлектродной вставке и к входному аноду, а к выходному аноду через трубку, подающую воду 10. Изоляция между корпусами достигается при помощи текстолитовой пластины, имеющей канал для прохождения воды 12 и одновременно поддерживающий при помощи 3-х шпилек 13 нижнюю часть анодного узла, т.е. межэлектродные вставки и выходное сопло. В верхнем катодном узле имеются корпус катод, а соединенный токопроводом одновременно отводящим воду из плазмотрона; формирователь газа и электрод.

Водяная магистраль плазмотрона герметична за счет применения специальных разъемов и уплотнений. Изоляторы, верхний и нижний корпуса скрепляются между собой четырьмя стальными винтами. Катодный узел плазмотрона содержащий водоохлаждающий корпус, в котором закреплен вольфрамовый электрод с лантанированной вставкой, хорошо обеспечивающий эмиссионные свойства, является наряду с анодом основным элементом плазмотрона, определяющим его ресурс работы. Корпус катода выполнен из меди и имеет отверстия для подачи рабочего газа.

Газоформирователь, обеспечивающий аксиальное течение газа, служит для разделения его равномерной подачи в приэлектродный участок и способствует хорошей стабилизации разряда.

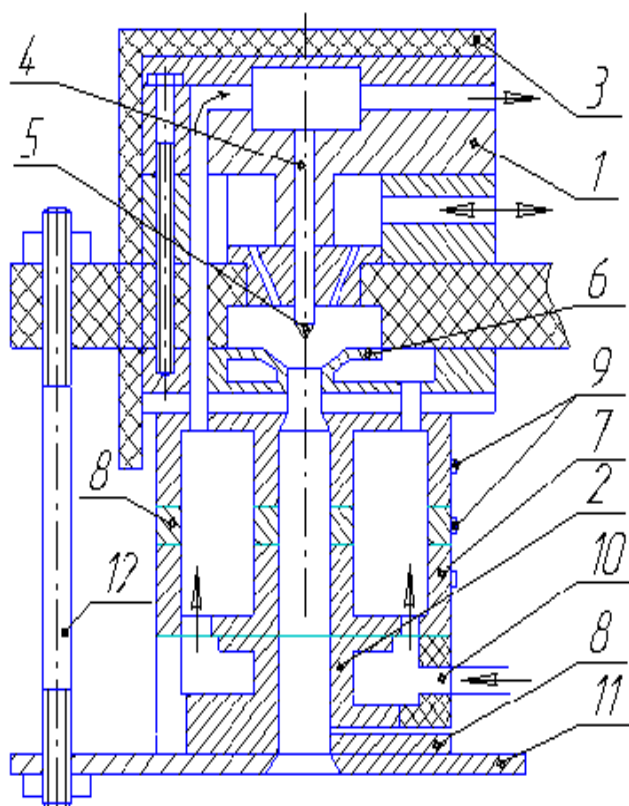


Рисунок 1. Схема плазмотрона

1- катодный узел; 2- анодный узел; 3-рукоятка; 4- катод; 5- вольфрамовый электрод; 6- входное сопло; 7- межэлектродная вставка; 8- медный анод;  
9- токопровод; 10- водяная трубка; 11- пластина; 12- шпильки;

Газоформирователь из тугоплавкого и теплопроводного материала. Выходное сопло, как и входное, является самой теплонапряженной деталью и служит для формирования плазменной струи. Сопло имеет специальное отверстие для ввертывания штуцера подачи порошков на срез сопла. Секция межэлектродных вставок выполняется тоже из меди и служит для увеличения фиксации дуги в плазмотроне, а так же формирования потока.

Фиксация длины дуги значительно уменьшает пульсации потока, частота которых соизмерима со временем нахождения частиц в зоне нагрева. Это положительно влияет на качество нанесения покрытия. Кроме того увеличение длины дуги приводит к увеличению температуры и скорости плазменной струи, позволяет повысить производительность процесса. В плазмотронах с межэлектродными вставками применяется многоступенчатая схема возбуждения дугового разряда. Она включает поджигающее устройства, или осциллятор и систему последовательного включения и отключения секций межэлектродных вставок. Сначала электрическая дуга зажигается между катодом и входным соплом, а далее при последовательном включении сначала первой секции вставок далее с последующими секциями. После зажигания основной дуги между электродом и соплом, дуга проходит под давлением рабочего газа, подаваемого в камеру. Анодное пятно дуги перемещается по оси анодного узла, и столб дуги оказывается сбалансированным и фиксированным.

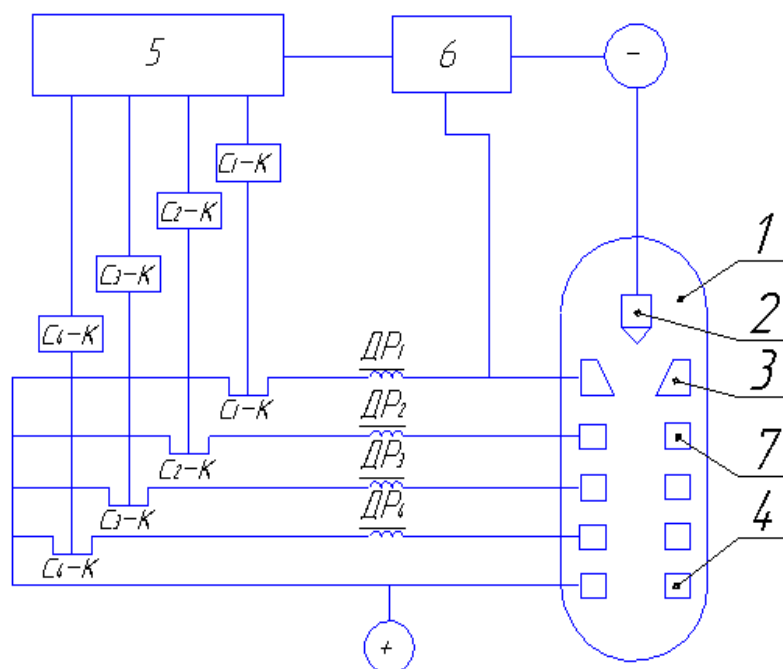


Рисунок 2. Схема зажигания дуги

1-плазмотрон; 2-катод; 3- входное сопло; 4- выходное сопло; 5-блок управления; 6- осциллятор; 7- секция МЭВ; ДР-дросель; С-К- контакторы

### б) Расчет параметров плазмотрона. Геометрический расчет

Настоящее время нет единой методики расчета плазматронов, тем более плазматронов с межэлектродными вставками, поэтому некоторые размеры будем брать из расчетов аналогичных плазматронов. Все рассчитываемые и принимаемые геометрические показатели на рисунке 3. Выберем диаметр электрода из диапазона диаметров плазматронов с межэлектродными вставками,  $d = 6 \dots$  мм. Принимаем минимальный диаметр, так как нужен менее мощный плазматрон или

известный ( $d_3 = 0,6$  см) применяемый в промышленности плазматрон. Определяем диаметр выходного сопла по соотношению:

$$d_{bc} = 1,25 \cdot d_3, \text{ см:} \qquad d_{bc} = 1,25 \cdot 0,6 = 0,8 \text{ см}$$

(1)

Исходя из баланса мощности плазматрона, следует

$$d_{bc} / l_A (1 + 2 / s_{bc} / d_{bc}) = 0,105 Q_B \qquad (2)$$

где  $s_c$  - толщина стенки или сопла, см

$Q_B$  - расход охлаждающей воды в плазматроне, л/мин

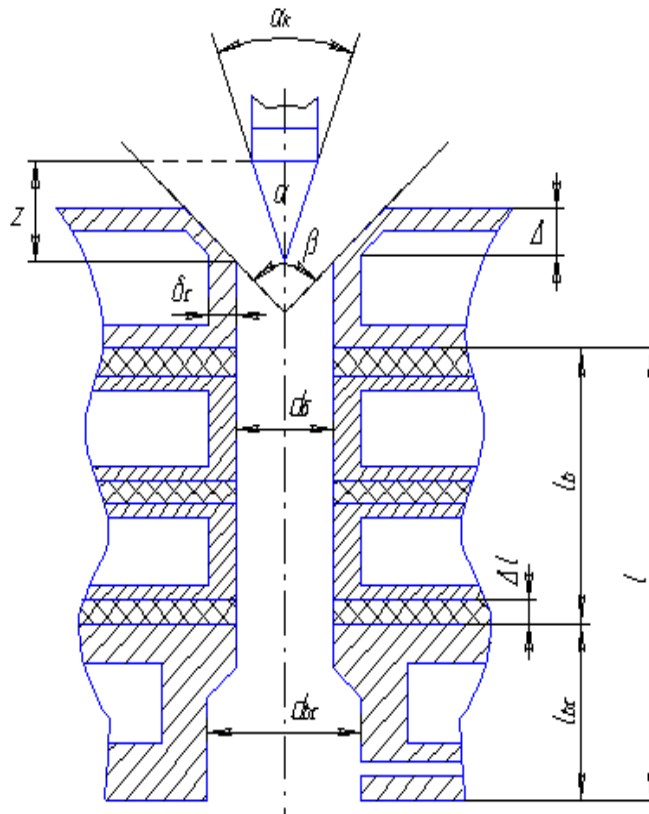


Рисунок 3. Схема геометрических параметров плазматрона

В известных плазматронах расход воды обычно составляет  $Q_B = 8 \dots 12$  л/мин.

Рассчитаем толщину стенки для  $Q_B =$  л/мин преобразовав формулу (2).

$$s_c = 1 / 2 \cdot d_{bc} (10 d_{bc} / 0,15 \cdot d_{d-1}); \text{ см} \qquad (3)$$

поставив значения, получим:

$$s = 1 / 2 \cdot 0,8 (10 / 0,8 / 12 \cdot 0,15 - 1) = 0,52 \text{ см} = 0,052 \text{ м}$$

расстояние от вершины электрода до верхнего среза цилиндрического участка сопла.

$$= 0,432 \cdot d_{bc}, \text{ см}$$

(4)

$$l = 0,432 \cdot 0,8 = 0,34 \text{ см} = 0,034 \text{ м.}$$

высоту заточки вольфрамового электрода определяем по формуле

$$Z_0 = (\text{tg } \alpha / 2) / (d_3 / 2), \text{ см} \qquad (5)$$

где  $\alpha$  - угол заточки вольфрамового электрода, принимаем  $\alpha = 90$  градусов.

$$Z_0 = \text{tg} 30^\circ / 0,3 = 1,2 \text{ см} = 0,012 \text{ м}$$

Угол сужения входной части канала примем  $\alpha = 90^\circ$ .

Определим диаметр входного сопла и канала:  $d_c = 0.75 \cdot d_{вс}$ , см

(6)

Рассчитаем длину межэлектродной вставки:  $l_{в1} = l_B / n$ , см

(7)

где,  $n$ - число межэлектродных вставок.

$l_B$  – длина секции из межэлектродных вставок

$$l_B = l - l_{вс} - \Delta l, \text{ см}$$

(8)

где  $l$  – общая длина канала, см;  $\Delta l$  - толщина изоляции между вставками, см;

$l_{вс}$  – длина выходного сопла, см

В работе приведен расчет плазматронов с межэлектродными вставками, отсюда примем:  $l = 8$  см;

$l_{вс} = 2,5$  см;  $\Delta l = 0,1$  см;  $n = 5$

$$l_B = 8 - 2,5 - 0,1 \cdot 6 = 4,9 \text{ см, отсюда } l_{в1} = 4,9 / 5 = 0,98 \text{ см}$$

Направление ввода материала примем перпендикулярное осевой линии канала, то есть угол ввода материала  $\alpha = 90^\circ$

#### ***в) Расчет деталей на прочность.***

Шпильки стягивают верхнюю и нижние части плазмотрона и обеспечивают герметичность в канале для охлаждения плазмотрона. Условия прочности на растяжение:

$$\sigma_p = F_a / A_{ш} \leq [\sigma_p]$$

(9)

где,  $F_a$  – осевая нагрузка, действующая на одну шпильку, кг;

$[\sigma_p]$  – допустимое напряжение на растяжение кг/мм<sup>2</sup>;  $[\sigma_p] = 30$  кг/мм<sup>2</sup>.

$A_{ш}$ - площадь поперечного сечения шпилек, мм<sup>2</sup>

Определим осевую нагрузку на шпильки:  $F_a = P \cdot S$ , н

(10)

где  $P$  – давление действующее на нижнюю полость канала, кг/см<sup>2</sup>;

$S$ - площадь поперечного сечения, мм<sup>2</sup>;

$P = 8$  кг/см<sup>2</sup> по техническим условиям плазматронов.

$D = 14$  мм,  $d = 8$  мм, тогда:  $S = \pi D^2 / 4 - \pi d^2 / 4 = \pi / 4 (D^2 - d^2)$ ,

(11)

Подставив значение найдем:  $S = \pi / 4 \cdot 3,14 \cdot (14^2 - 8^2) = 103,6$  мм<sup>2</sup>, отсюда

$$F_a = 0,08 \cdot 103,6 = 8,28 \text{ н.}$$

Из формулы (9) выразим площадь шпилек:  $A_{ш} = F_a / [\sigma]$ ; мм<sup>2</sup>,

(12)

$$A_{ш} = 8,28 / 30 = 0,276 \text{ мм}^2 = 0,00276 \text{ м}^2$$

В конструкции плазмотрона предусмотрены 3 шпильки.

$$A_{ш,} = A_{ш} / n, \text{ мм}^2$$

(13)

где  $n$  – число шпилек;  $A_{ш,}$ - сечение одной шпильки,  $A_{ш,} = 0,092$  мм<sup>2</sup>.

Диаметр одной шпильки:  $d_{ш,} = 4A_{ш,} / \pi$ , мм

(14)

$$d_{ш} = 4 * 0,092 / 3,14 = 0,35 \text{ мм} = 0,0035 \text{ м}$$

Примем шпильку наименьшим диаметром по ГОСТ с учетом коэффициента запаса;  $d_m = (2 \dots 5)$ .

$$d_m; \quad d_m = (2 \cdot 5) \cdot 0,35 = 5 \text{ мм}$$

#### **Расчет охлаждения плазмотрона**

Система охлаждения в плазмотроне необходима для принудительного отвода тепла от горячих деталей. Исходная величина для расчета системы охлаждения, количество теплоты необходимое отвести от плазмотрона в охлаждающую среду. Тепловые потери для различных длин межэлектродных вставок определяется по формуле:

$$Q = Q_a + Q_k + Q_{вс} \cdot Дж$$

(15)

где  $Q_a$  – потери тепла через анод, Дж;  $Q_k$  – потери тепла через катод, Дж

$Q_{вс}$  – потери тепла через вставки, Дж.

Будем считать, что все потери тепла отводятся водой, т.е.

$$Q = Q_{охл}, Дж$$

(16)

При длине вставок  $l_{вс} = 4,5$  см, тепловые потери составляют

$$Q_a = 21,3 \cdot 10^6 \text{ Дж}; \quad Q_k = 6,1 \cdot 10^6 \text{ Дж}; \quad Q_{вс} = 7,4 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$Q = 21,3 \cdot 10^6 + 6,1 \cdot 10^6 + 7,4 \cdot 10^6 = 34,8 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Определяем массовую подачу воды насосом:

$$Q_{вс} = Q_{охл} / C_{вс} (T_{вх} - T_{вых}), \text{ кг/ч}$$

(17)

где  $C_{вс}$  – удельная теплоемкость воды Дж/ кг/к

$$C_{вс} = 4,178. \text{ Дж/ кг/к}$$

$T_{вх}$  – температура входа воды, °К;  $T_{вых}$  – температура выхода воды, °К;

$T_{вх} = 288^\circ\text{К}$ ,  $T_{вых} = 308^\circ\text{К}$ . тогда

$$Q_{вс} = 34,8 \cdot 10^6 / 4,178 \cdot (308 - 288) = 610 \text{ кг/ч} = 10,2 \text{ л/мин}$$

#### **г) Расчет и обоснование параметров характеризующих режим работы плазмотрона.**

В плазмотронах с межэлектродными вставками время прохождения частиц газа увеличивается, тем самым температура достаточную для расплавления частиц можно достичь при меньших токах. Мощность плазменной струи зависит от длины канала, это можно выразить формулой.

$$q_{ст} = (T \cdot k \cdot L_k^{MЭВ}) / V_n; \text{ кВт}$$

(18)

где  $T$  – температура плазмы, С0;  $k$  – коэффициент теплопередачи, Дж/ м<sup>2</sup>;

$L_k$  – длина активной зоны, м;  $V_n$  – скорость плазменной струи, м/с

Существует формула для вычисления мощности плазменной струи в зависимости от тока дуги:  $q_{ст} = 6.38 G_r \cdot J_d \cdot L_k^{1,07} \cdot e^{0,088 L_k}$

(19)

где  $G_r$  – расход газа, м<sup>3</sup>/ч;  $J_d$  – ток дуги, А

Выразим ток дуги из формулы (19) и получаем выражение:

$$J_d = T \cdot l \cdot L_k / V_n \cdot 6,38 \cdot G_r \cdot L_k^{1,07} \cdot e^{0,088 L_k}; \text{ А}$$

(20)

расход газа примем из условия:  $3 < G < 5, \text{ м}^3/\text{ч}$

(21)

принимаем  $G = 4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $L_k = 0,08 \text{ м}$  (см. расчет конструкции);  $\kappa = 6...8,5 \text{ Дж}/\text{м}^2$  примем  $\kappa = 7,2 \text{ Дж}/\text{м}^2$ ;  $T = (12...14) \cdot 10^3, \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $V_H = (3...) \cdot 10^2, \text{ м}/\text{с}$ .

$e$  - экспонента

Подставив значения найдем:

$$J_A = 13 \cdot 10^3 \cdot 7,2 \cdot 10^3 \cdot 0,08 / 3,5 \cdot 10^2 \cdot 6,38 \cdot 4 \cdot 0,08^{1,07} \cdot e^{0,088 \cdot 0,08} = 126A$$

Для этого значения определим напряжение дуги по обобщенной формуле:

$$U_A = J_A / d \cdot 2,77 (J_A^2 / G_d)^{-0,38} \cdot (G/d)^{-0,27} \cdot (L_k/d)^{0,63}, \text{ В}$$

(22)

$$U_A = 126 / 0,008 \cdot 2,77 (126^2 / 4 \cdot 0,008)^{-0,38} \cdot (4 / 0,008)^{-0,27} \cdot (0,08 / 0,008)^{-0,63} = 192,7 \text{ В}$$

Мощность плазмотрона равняется:  $P_{пр} = J_A \cdot I_A, \text{ кВт}$

(23)

$$P_{пр} = 126 \cdot 192,7 = 24192 \text{ Вт} = 24,2 \text{ кВт}$$

Определим КПД плазмотрона:  $\eta = (P_{потр} - \Delta P) / P_{потр} \cdot 100, \%$

(24)

где  $\Delta P$  – потеря мощности

$$\Delta P = 34,8 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 34,8 \cdot 10^6 \cdot 0,27 = 9,4 \text{ кВт}$$

$$\eta = (24,2 - 9,4) / 24,2 \cdot 100 = 61 \%$$

### Выводы.

- в настоящей работе представлены некоторые расчеты по разработке плазмотрона для восстановления распределительных валов строительной и дорожной техники плазменной наплавкой;
- предложенная технология восстановления валов двигателей позволяет также использовать метод и сам плазмотрон и для восстановления других деталей двигателей.

### Библиографический список

1. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотроны. Конструкции, характеристики, расчёт./ – М.: Машиностроение, 1993, - 378 с.
2. Михайлов, Ю. Б. Конструирование деталей механизмов и машин: учеб. пособие для академического бакалавриата / Ю. Б. Михайлов. – М.: Издательство Юрайт, 2015. – 414 с.
3. Тойгамбаев С.К. Повышение долговечности деталей сельскохозяйственных и мелиоративных машин при применении термоциклической диффузионной металлизации. Автореферат на соискание звания кандидата технических наук. РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. Москва. 2000г.
4. Тойгамбаев С.К. Применение термодиффузионных процессов для упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственной техники. Монография, Рекомендован УМО ВУЗов МГУП. Редакционно-издательский. Отд. МГУП, 2011. г. Москва. с. 156.
5. Шнырёв А.П., Тойгамбаев С.К. Основы надёжности транспортных и технологических машин. Учебное пособие для студ. технич. ВУЗов УМО МГУП. Издательская. «Компания Спутник +» 2006, г. Москва. с.102.

6. Тойгамбаев С.К. Испытания двигателей на специальных стендах. ж. Актуальные проблемы современной науки № 5, (84) 2015. г. Москва. с. 163-167.
7. Тойгамбаев С.К., Шнырев А.П., Голиницкий П.В. Метрология. Стандартизация. Сертификация: Учебник для ВУЗов./–М.: Изд. Спутник+, 2017, - 375 с.
8. Тойгамбаев С.К. Повышение надежности изготовления резьбовых соединений. ж. Вестник. Агроинженерия. Московский государственный агроинженерный университет им.В.П. Горячкина. № 3 (59) 2013. г. Москва. с. 45- 46.
9. Тойгамбаев С.К. Повышение долговечности деталей сельскохозяйственных и мелиоративных машин при применении процесса термоциклической диффузионной металлизации. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. Москва. 2000г.