

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ  
ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ  
ГАЗОПЛАЗМЕННЫМ  
МЕТОДОМ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ**

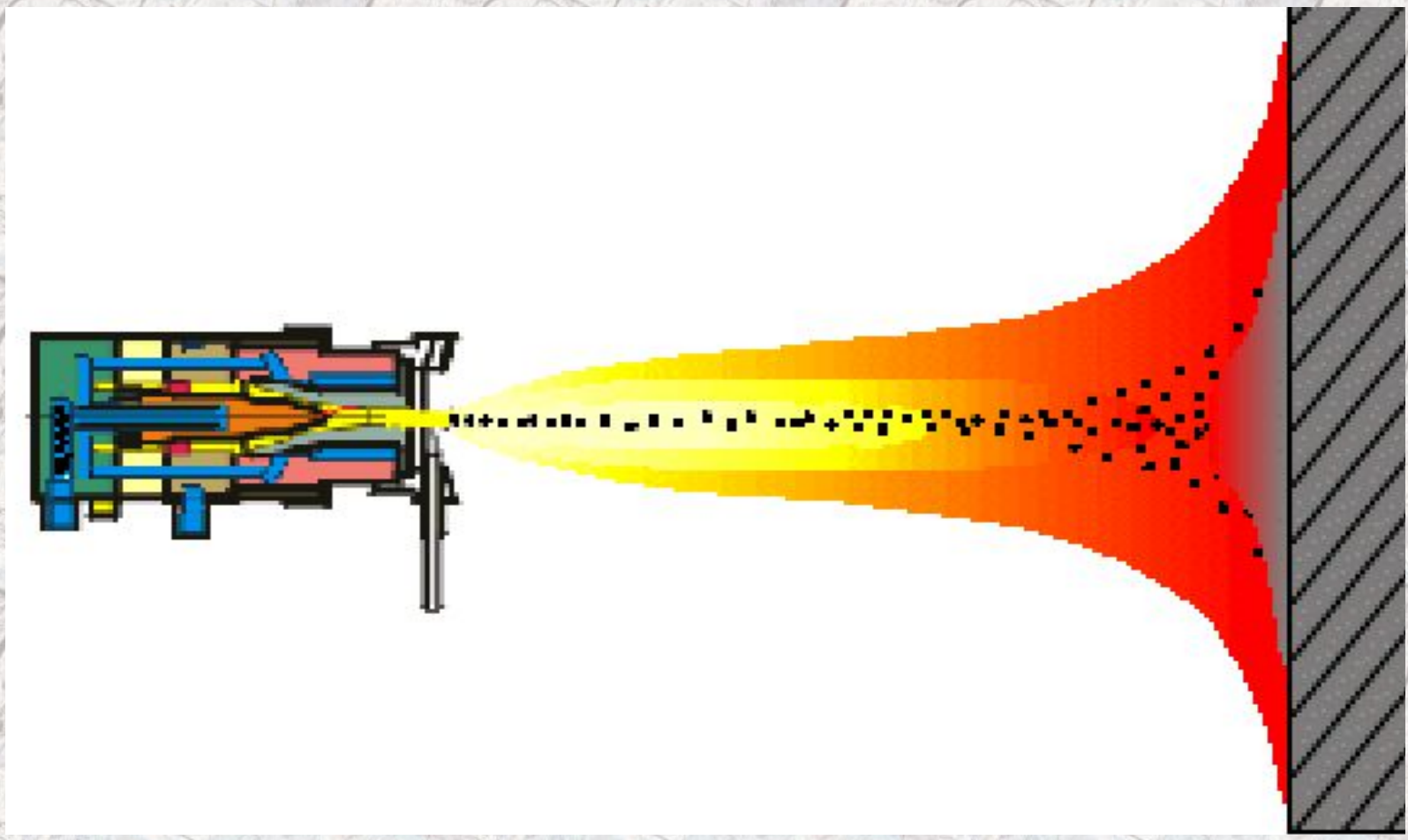
Целью настоящей работы являлось исследование влияния термодинамических параметров гетерогенной плазменной струи на формирование покрытий с заданными функциональными свойствами, в частности, покрытий с защитными свойствами на различных подложках.

Решались следующие задачи:

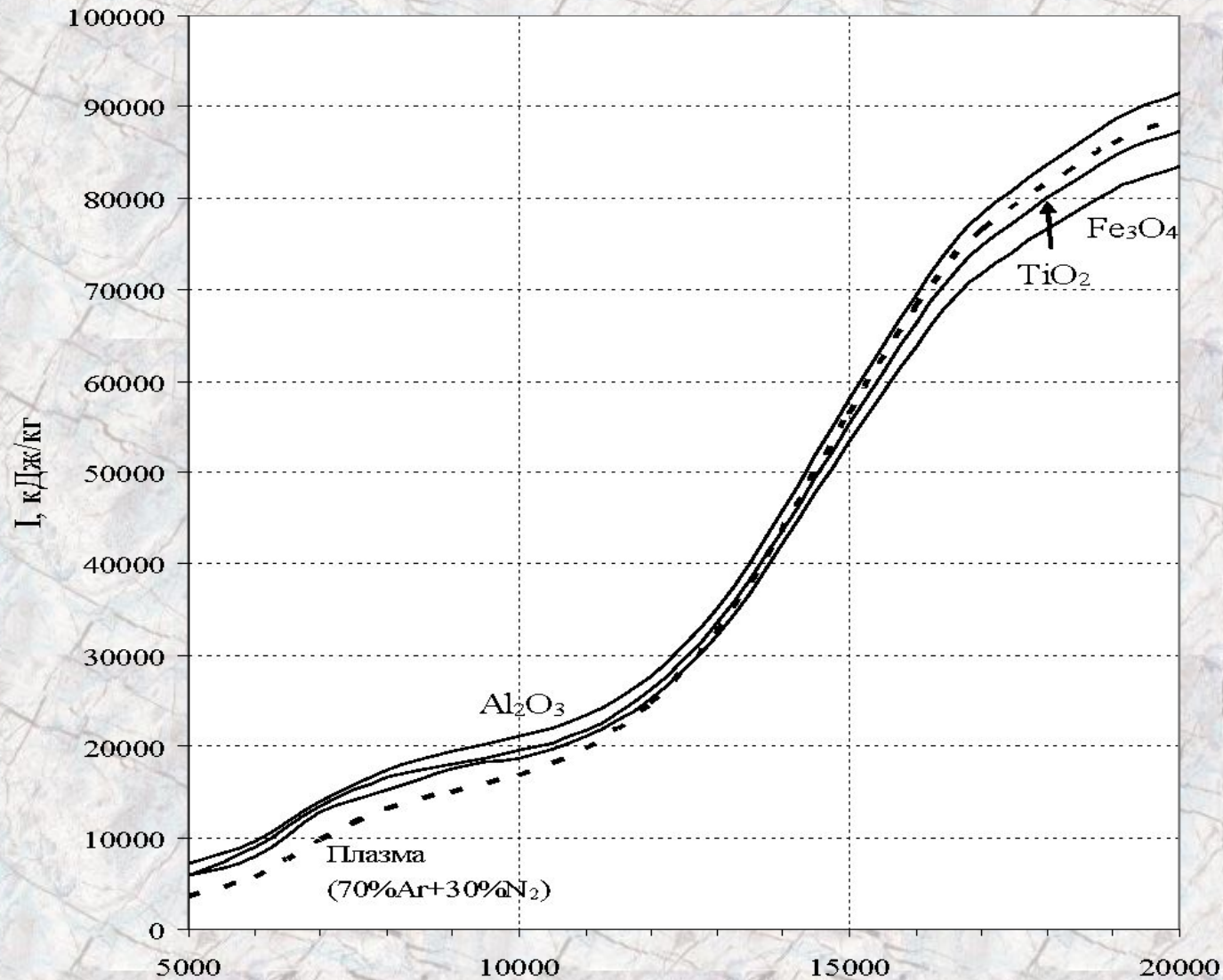
1. Исследование состава и термодинамических характеристик плазмообразующих газов ( $\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ , смеси  $x\text{Ar} + (1-x)\text{N}_2$ ,  $x\text{Ar} + (1-x)\text{H}_2$ ) в зависимости от температуры с применением методов термодинамического моделирования.
2. Моделирование равновесного состава и термодинамических свойств систем "плазма + частица".
3. Моделирование формирования покрытий с использованием программного комплекса «Plasma 2002».
4. Практическое применение метода плазменного напыления для получения покрытий с защитными свойствами на стальных (чугунных) подложках.

ГУ ИМЕТ УрО РАН  
Лаборатория математического  
моделирования металлических,  
оксидных и солевых систем

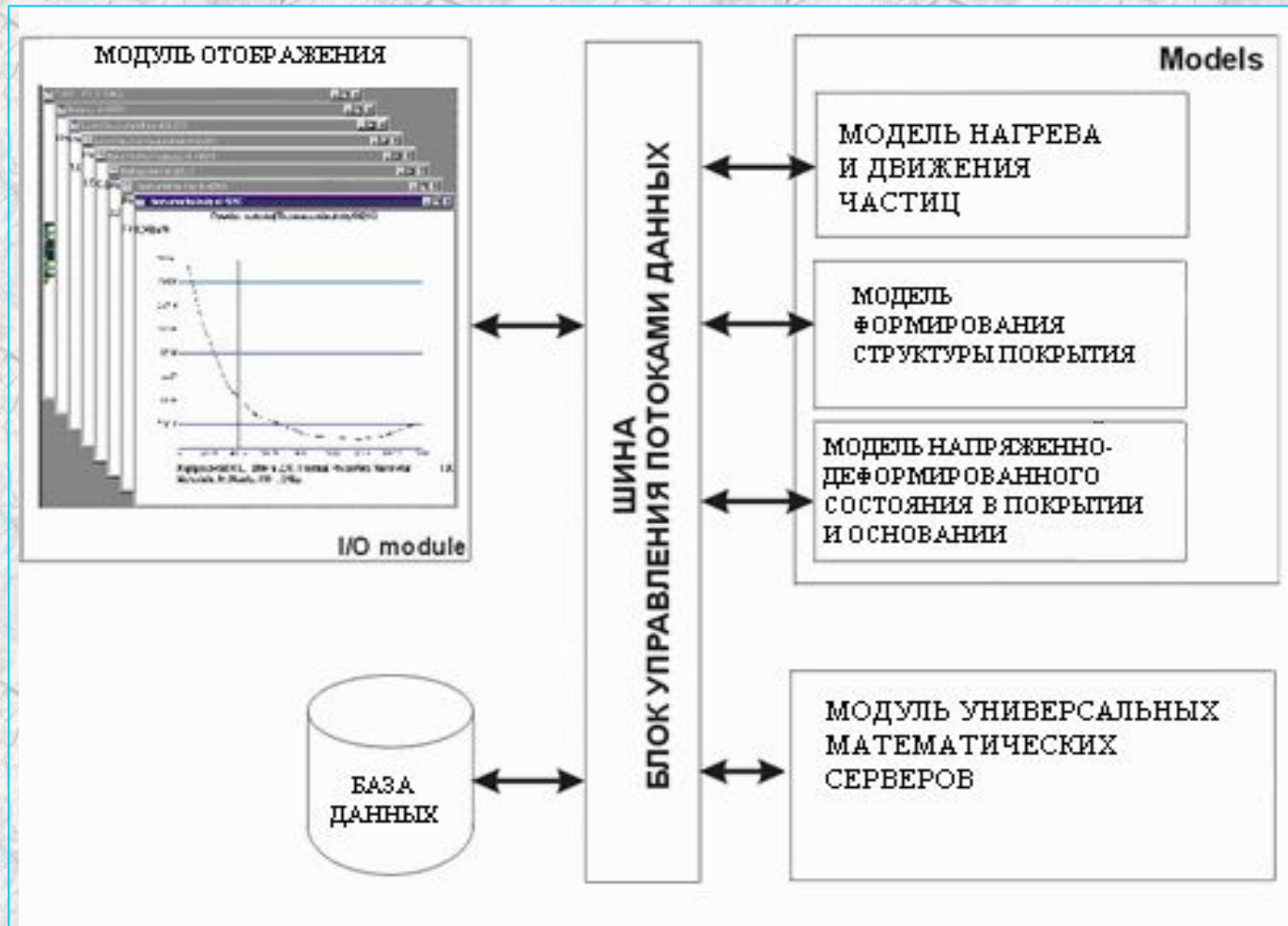
# Процесс плазменного напыления



Энтальпия системы  
плазма + частица  
Состав плазмообразующего газа -  
70%Ar+30%N<sub>2</sub>.  
Частица - оксиды



# Программный комплекс «PLASMA 2002»



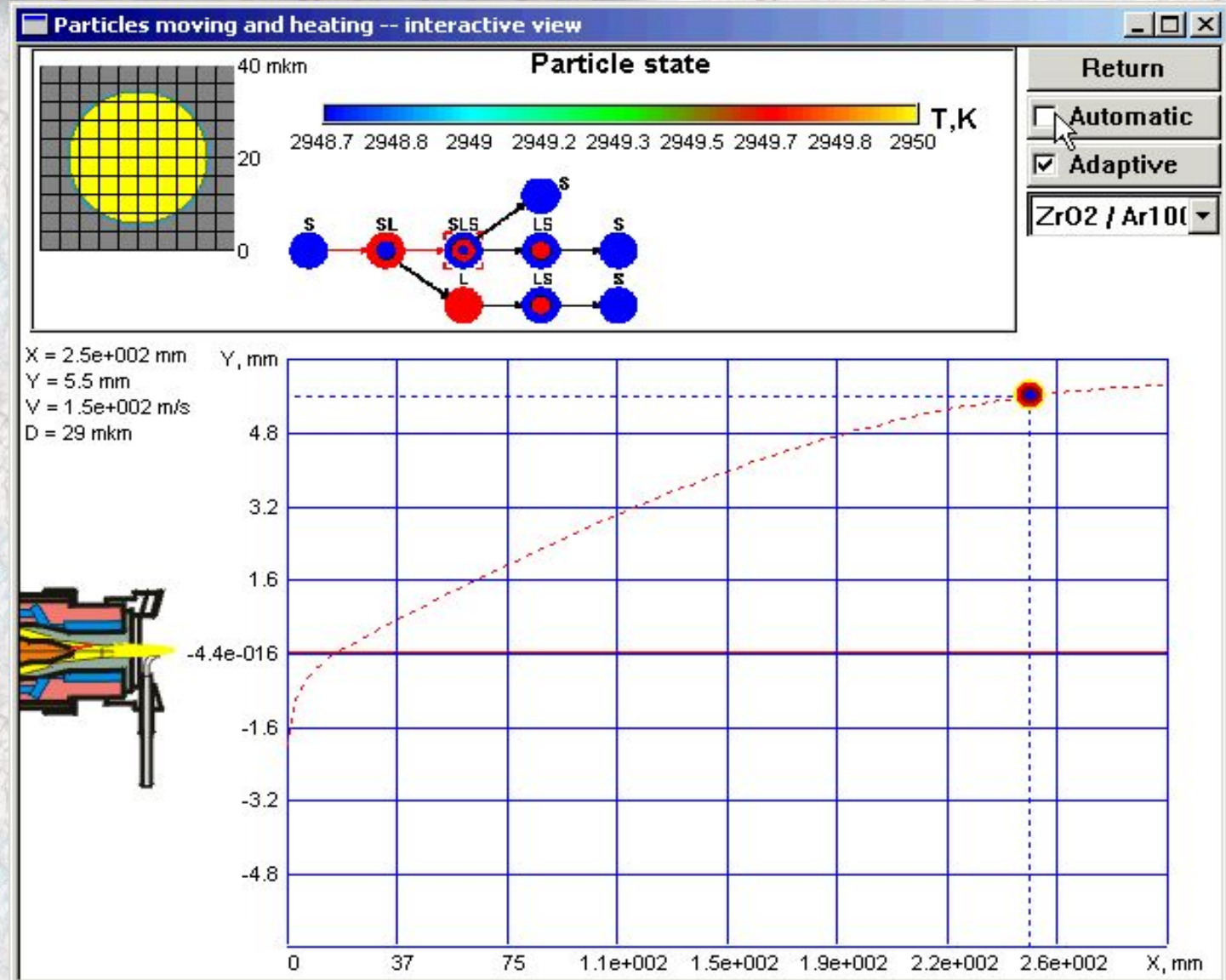
**Исследования проведены со следующими исходными данными:**

- плазмообразующий газ - N<sub>2</sub>;**
- материал напыляемого порошка - оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;**
- начальный диаметр частиц – 63 мкм;**
- начальная температура - 300 К;**
- дистанция напыления - 200 мм;**
- начальная скорость ввода частиц изменялась от 2 до 14 м/с (с шагом 2 м/с)/**

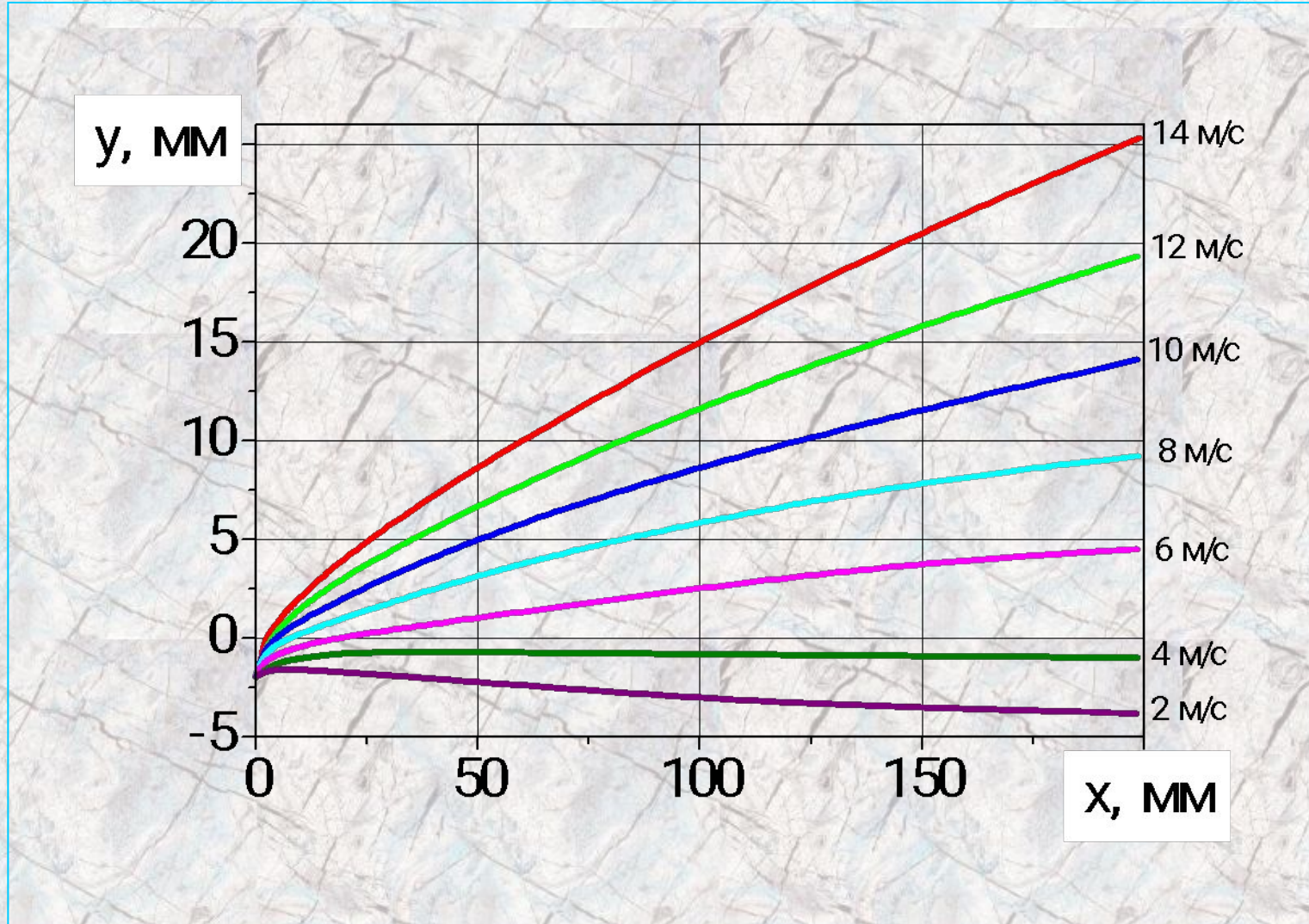
**Исследовалось влияние начальной скорости ввода частиц в плазменную струю на:**

- траекторию движения частиц в плазменной струе;**
- изменение скорости полета частиц порошка вдоль оси плазменной струи с момента их ввода;**
- изменение температуры в центре частицы при нахождении в плазменной струе.**

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА И ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ПОРОШКА В ПЛАЗМЕННОЙ

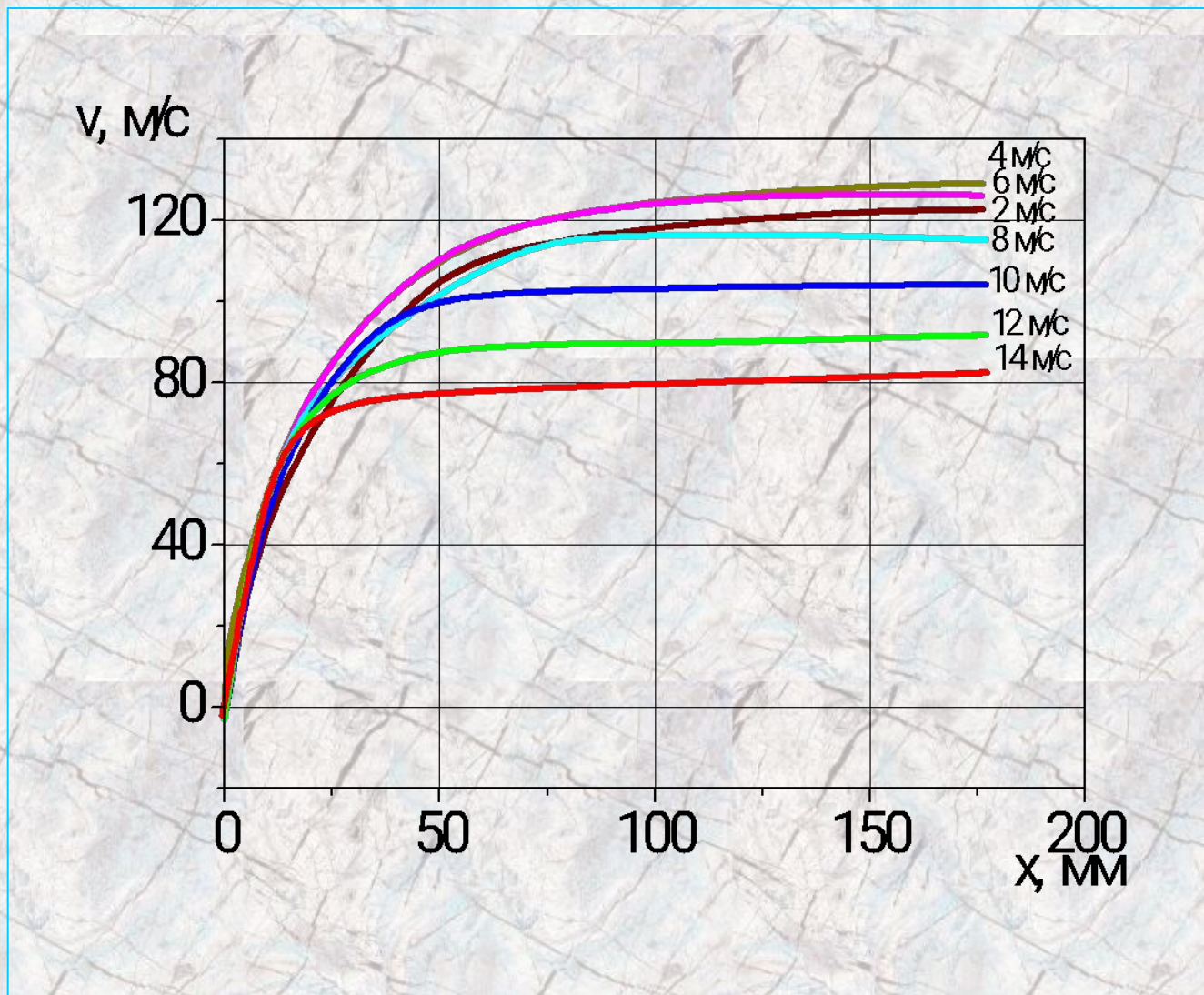


# Траекторию движения частиц в плазменной струе

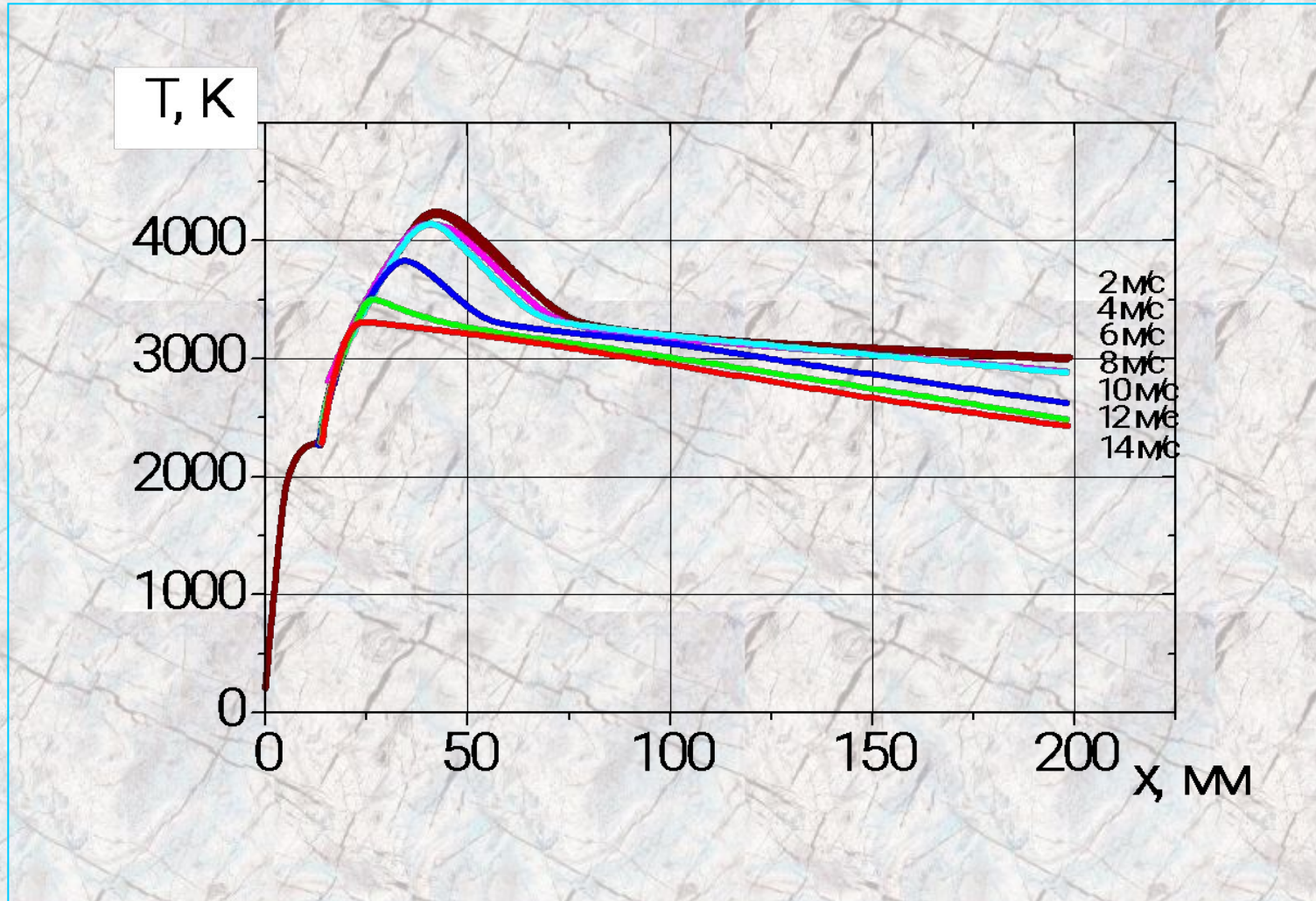




# Изменение скорости полета частиц порошка вдоль оси плазменной струи с момента их ввода



# Изменение температуры в центре частицы при нахождении в плазменной струе



**Таблица 1.**

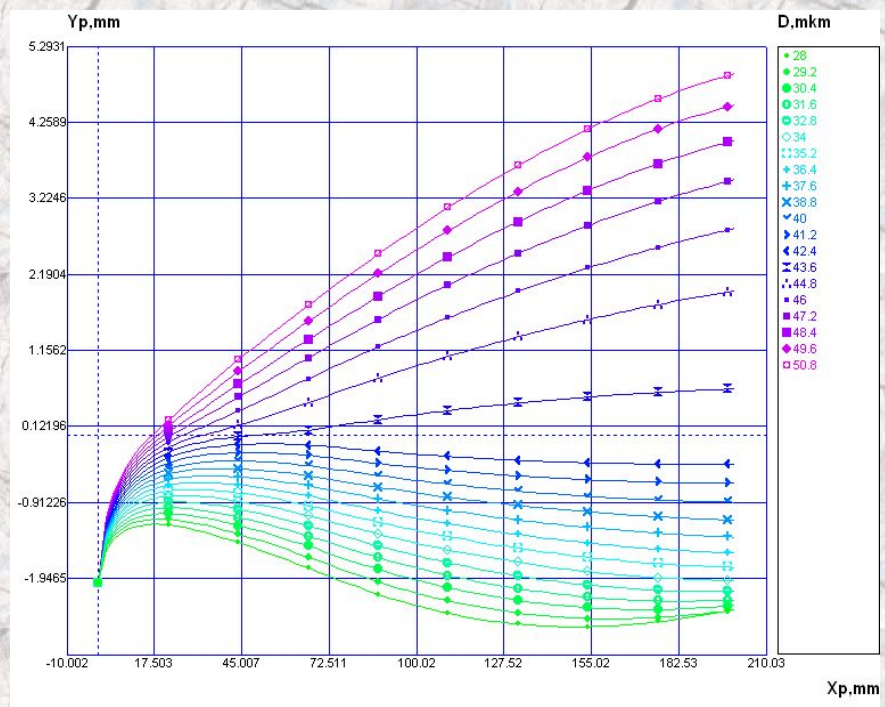
Начальная скорость частиц порошка вводимого в плазменную струю, м/с	Диаметр частицы порошка в момент соударения с поверхностью, мкм	Максимальная скорость частиц в плазменной струе, м/с	Пористость покрытия, %	Шероховатость покрытия, мкм
2	38	120	4.4	11.0
4	37	125	4.19	10.8
6	37	122	4.06	10.6
8	39	115	4.00	10.0
10	44	105	4.03	13.0
12	51	95	4.20	15.5
14	59	85	4.26	16.6

## Комплексное моделирование процесса плазменного напыления

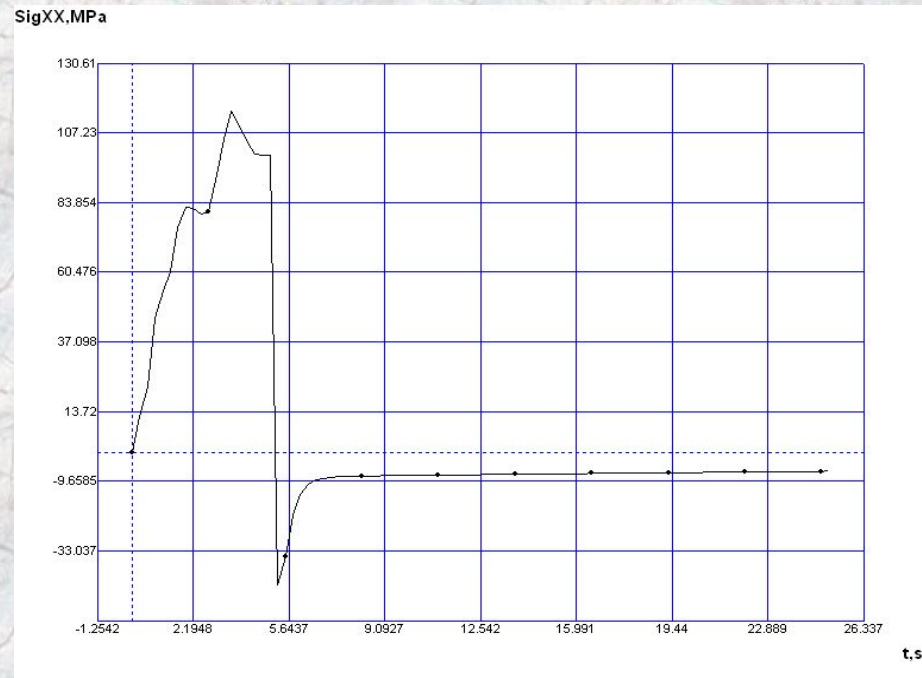
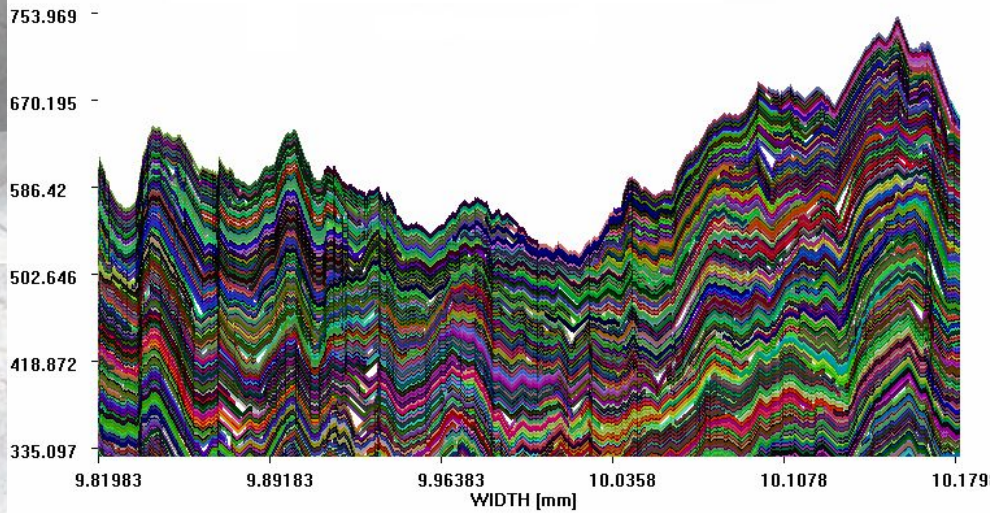
**Исследования проведены со следующими исходными данными:**

- плазмообразующий газ – Ar (100%), Ar+H (90%+10%);
- материал напыляемого порошка - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>;
- начальный диаметр частиц – D = 40 мкм;
- начальная температура - 300 К;
- дистанция напыления - 200 мм;
- начальная скорость 8 – 12 м/с.

**Траектория полета частиц**



Структура покрытия TiO<sub>2</sub>, пористость 5,5%.



**Динамика изменения напряжений в интерфейсном слое системы покрытие-основание**

Порошок	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				ZrO <sub>2</sub>				TiO <sub>2</sub>			
	Ar	Ar+H	Ar	Ar+H	Ar	Ar+H	Ar	Ar+H	Ar	Ar+H	Ar	Ar+H
Плазмообразующий газ												
Начальная скорость ввода частиц, V <sub>0</sub> , м/с	8		12		8		12		8		12	
Дистанция проплавления, мм	45	40	70	45	50	45	80	50	40	38	50	43
Скорость частиц в момент соударения, V <sub>г</sub> , м/с	163	175	155	157	105	105	92	82	180	190	160	170
Шероховатость, R <sub>z</sub> , мкм	16,1 – 8,1				10-7				8,5 -6,5			
Пористость, %	9,88 – 8,96				3,58 – 2,03				7,5 - 5,5			

**Эксперимент 1: Получение двухслойного износостойкого покрытия (основа - серый чугун, марки СЧ-10, подслой - механическая смесь ПН85Ю15 и ПН70Ю30, защитный слой – многокомпонентный порошок МКП 1 ( $Al_2O_3$  и  $ZrO_2$ )).**

**Разработан технологический процесс восстановления волоочильных пирамид ЗАО «Уралкабель».**

**Эксперимент 2: Получение термостойкого покрытия. Порошковые материалы: подслой – ПТНА-01; основные слои –  $Al_2O_3$  (механическое плакирование мелкодисперсным Al); МКП 2 (основа  $TiO_2$  с подшихтовкой ПГСР-3, 4 от 10 до 50%).**

**Разработан технологический процесс упрочнения металлических отжиговых поддонов для прокалки катализаторов.**

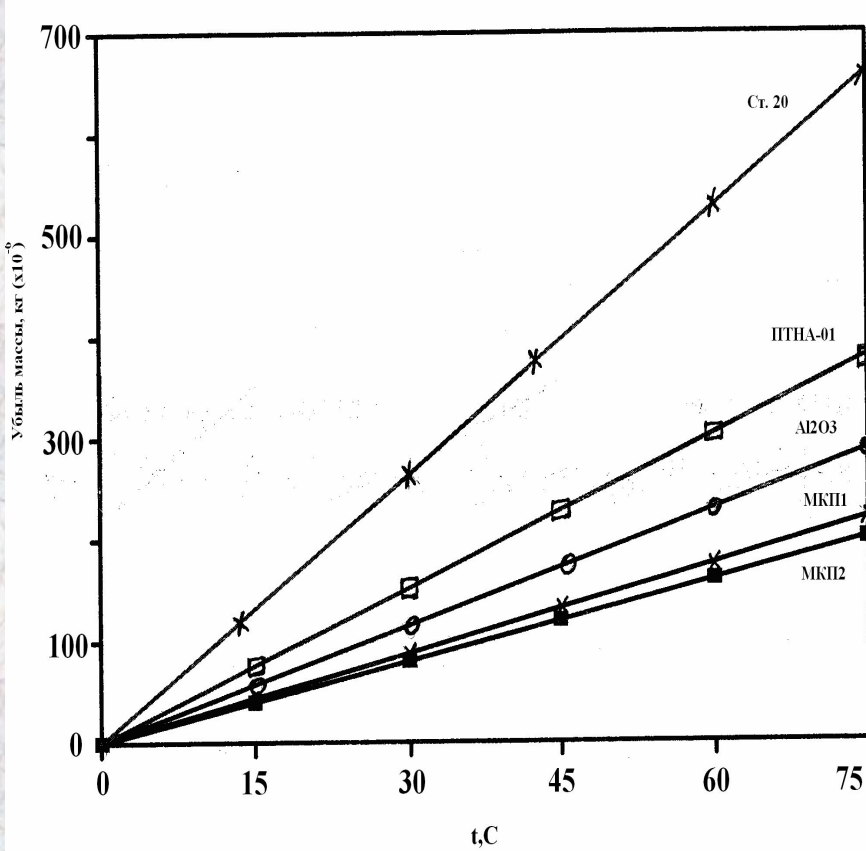
# РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

**Средние значения твердости покрытий исследуемых материалов.**

№	Порошок	Твердость, HRC	Толщина покрытия, мм
1.	МКП 1	59	2.0
2.	МКП 2	61	2.0
3.	Al2O3	57	2.0

**Средние значения прочности сцепления покрытия с подложкой,  $\sigma$  кг/мм<sup>2</sup>.**

№	Порошок	Дробеструйная обработка	Дробеструйная обработка с травлением 10% HNO <sub>3</sub>
1.	МКП 1	22	37
2.	МКП 2	23	38
3.	Al2O3	19	28



**Зависимость износа от времени испытаний**