

Исследование стойкости
нагревательных элементов
высокотемпературных вакуумных
печей из композиционных
материалов с карбидными
покрытиями

Аспирант: Пандаков К.М.

Научный руководитель: д.т.н., проф. Кручини А.М.

НИУ «МЭИ» кафедра ФЭМАЭК

Рабочая атмосфера



Вакуум

Инертные газы

Слабо окислительная

Восстановительная

Спекание, карботермическое или металлотермическое
восстановление металлов из их оксидов, цементация

пары воды, диоксида углерода,
кислорода

Применяемые материалы для нагревательных элементов



Металлические



Углеродные



Сплавы

сопротивления



Тугоплавкие

металлы

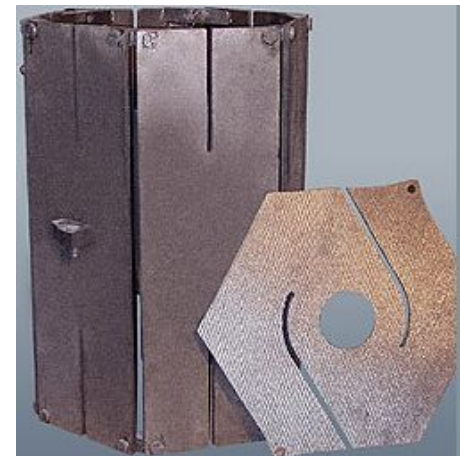


Графит

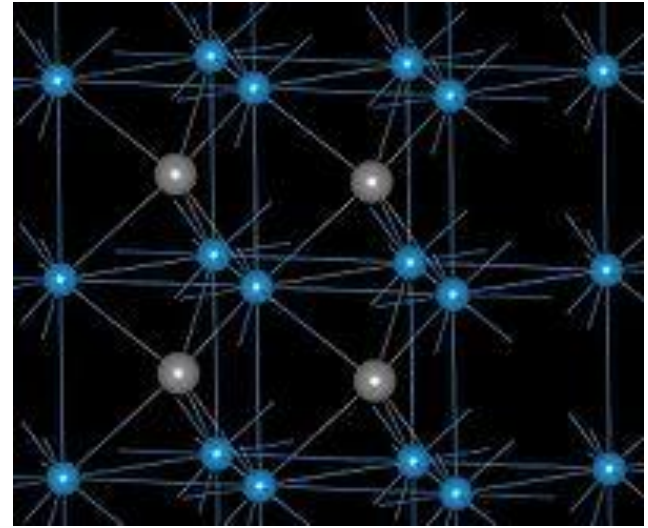
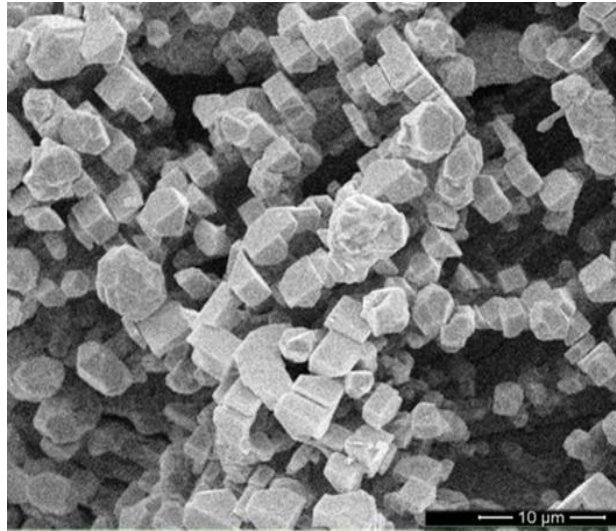
УУКМ

- X20H80-H
- X23Ю5T
- MoSi₂
- SiC

- W
- Mo
- T
- a
- Nb



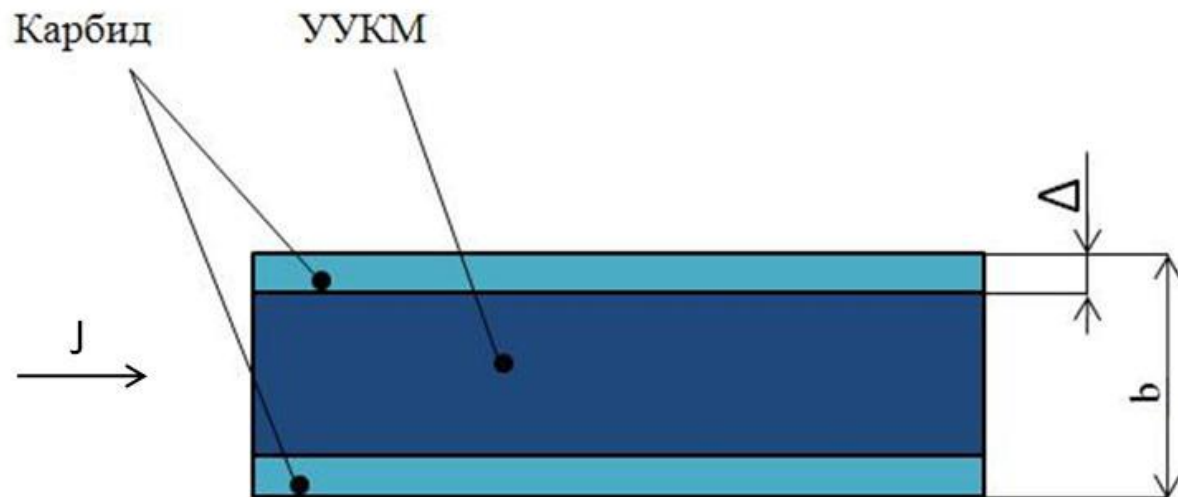
Применение тугоплавких карбидов



Горячее прессование
порошка

Литье
(расплавленный $Me + C$)

Способы получения карбидного слоя на УУКМ



Обработка
металлоорганическими
соединениями

Взаимодействие
с расплавленными
металлами

Прямое и
косвенное
восстановление
оксидов
металлов

Обработка

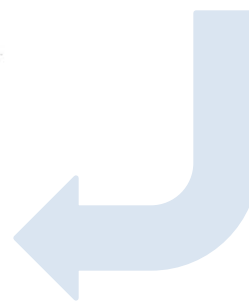
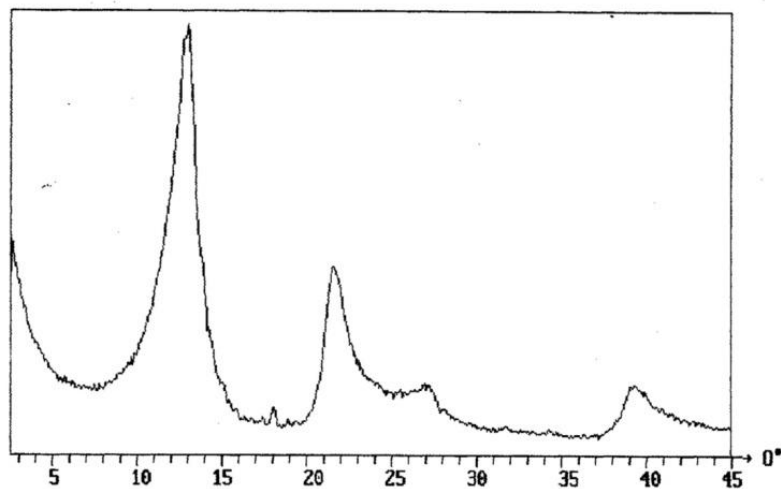
металлоорганическими соединениями



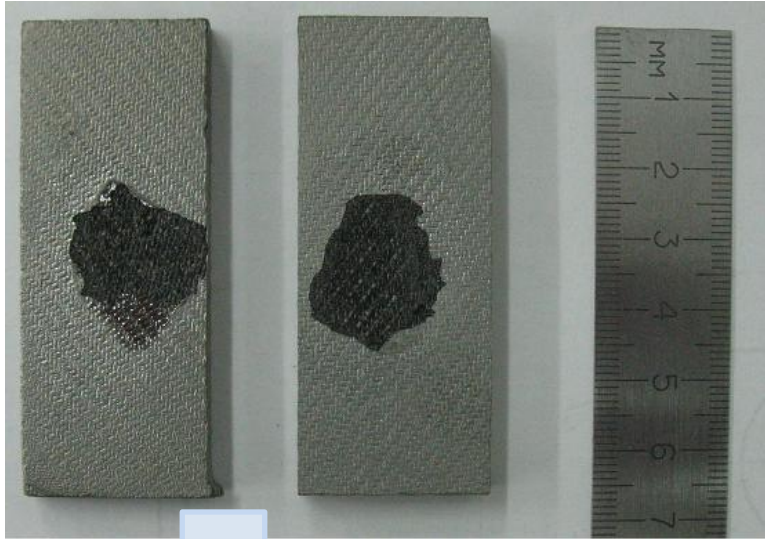
Результат пропитки титаном
химическим методом



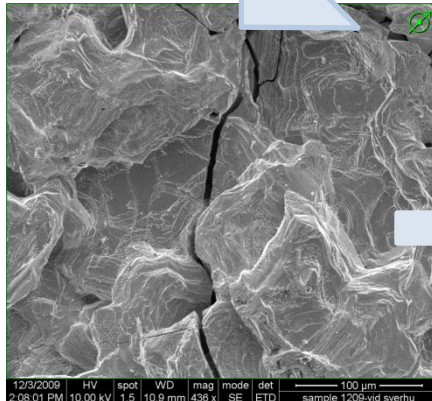
После прогрева при $t=300-400^{\circ}\text{C}$
в аргоне



Взаимодействие с Расплавленными металлами



Результат пропитки образца из УУКМ
сплавом Ti-Zr ($t=2000^{\circ}\text{C}$, 10^{-2}Па , 2ч)

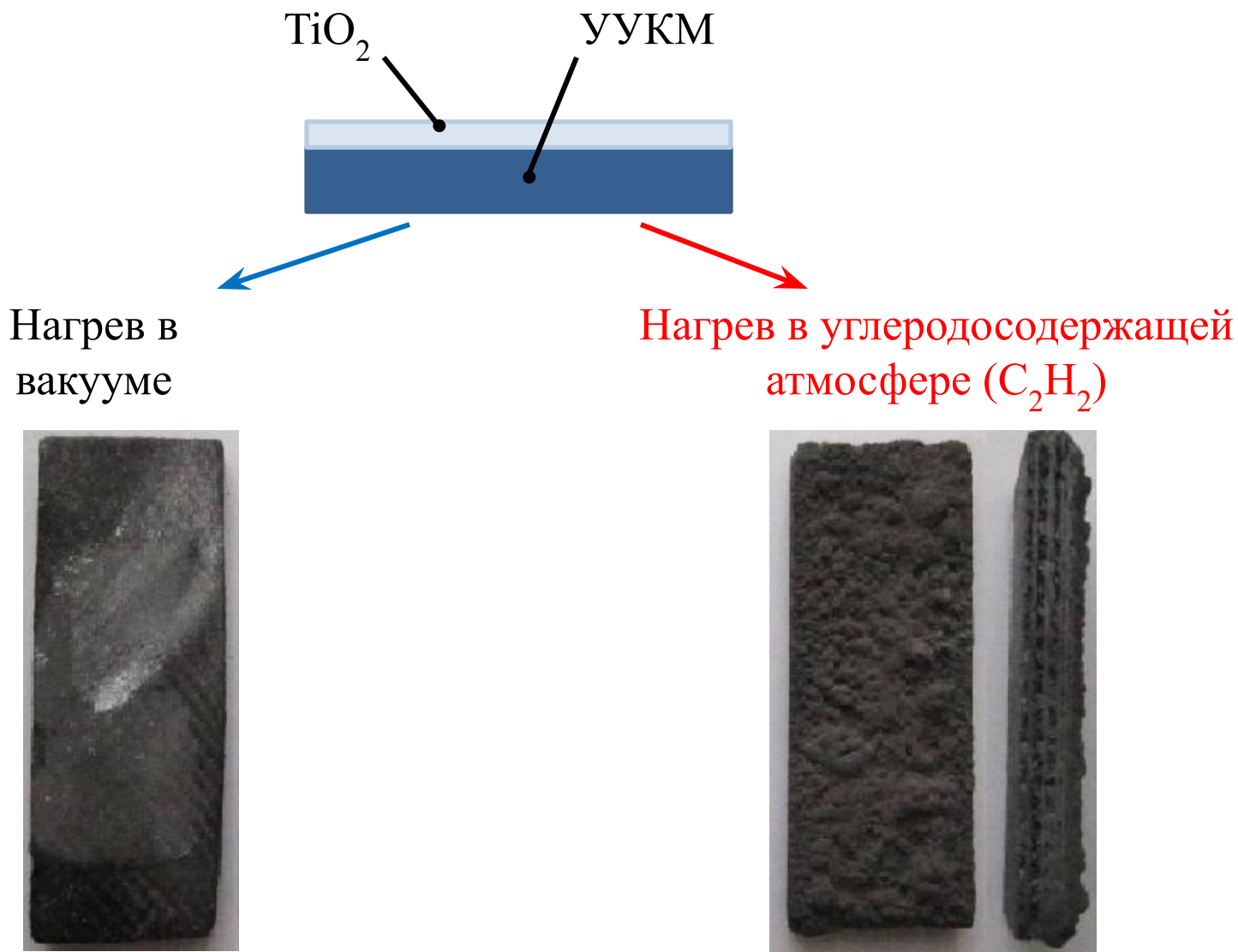


То же с добавлением
порции металла ($t=2000^{\circ}\text{C}$, 10^{-2}Па , 2ч)

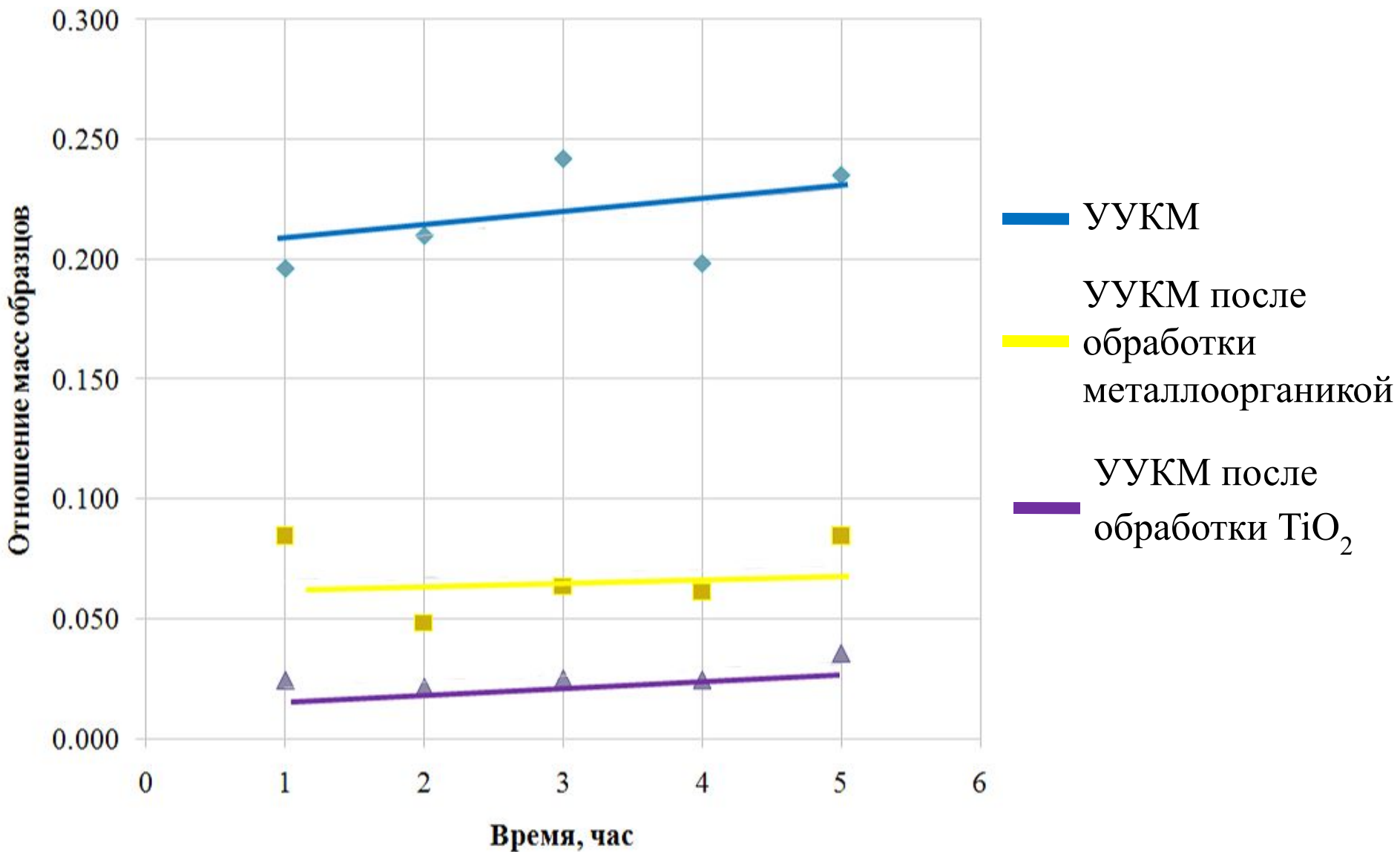


Образец со
слоем
карбидов
титана и
циркония
после 5
часов
испытаний
на воздухе

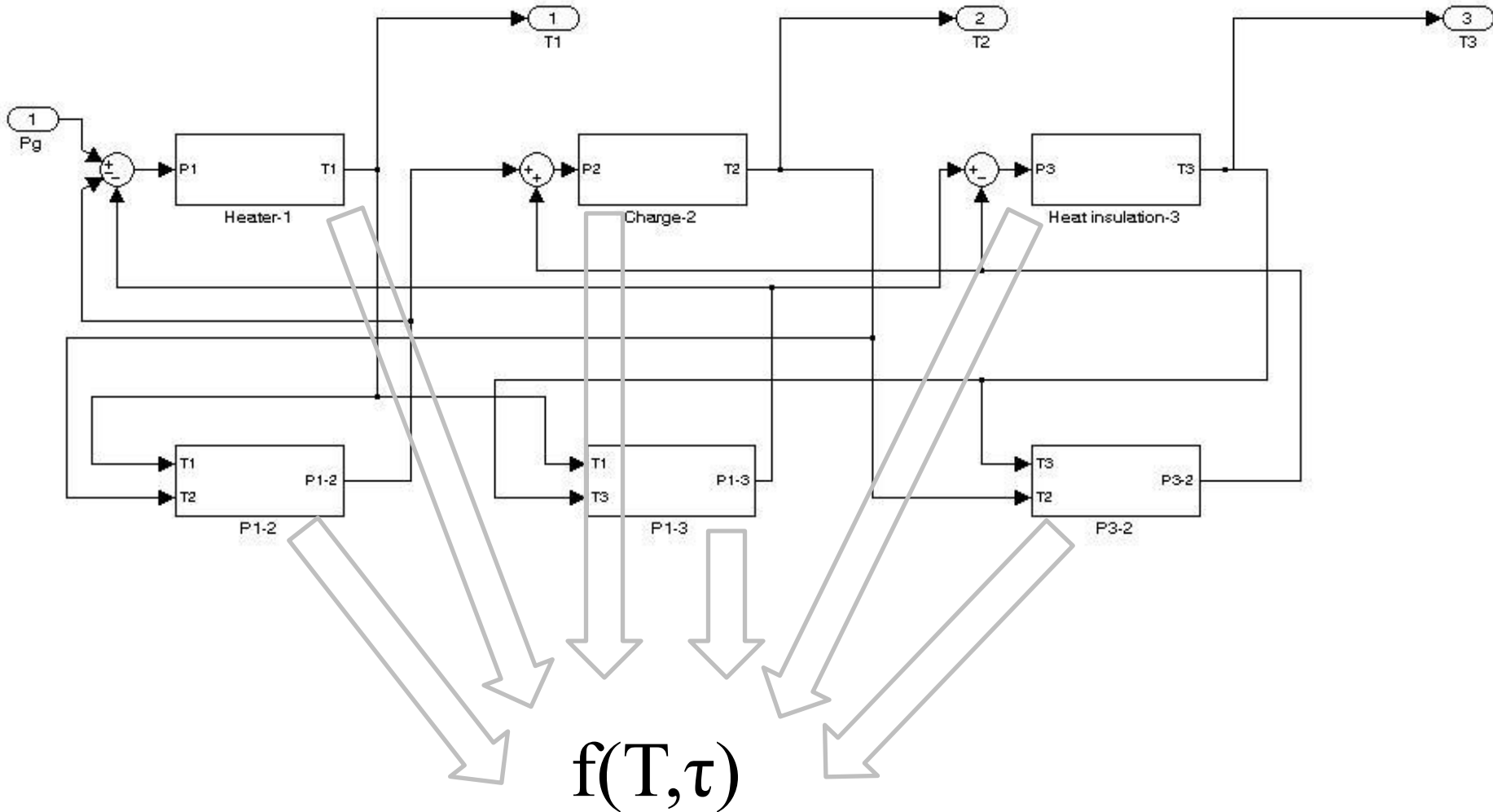
Прямое и косвенное восстановление оксидов металлов



Испытания на окисление при $t \leq 1000^{\circ}\text{C}$



Модель вакуумной ЭПС



Расчет коэффициентов схемы

Нагреватель (УУКМ)

b b пер

0.01 м 0.025

H L пер

0.23 м 0.23

L

0.52 м

Загрузка

b

0.08 м

Теплопр-сть

5 Вт/мК

H

0.07 м

Теплоемкость

1608 Дж/к2К

L

0.18 м

Плотность

1440 кг/м3

Теплоизоляция

b s

0.295 м 0.05 м

H

0.249 м

L

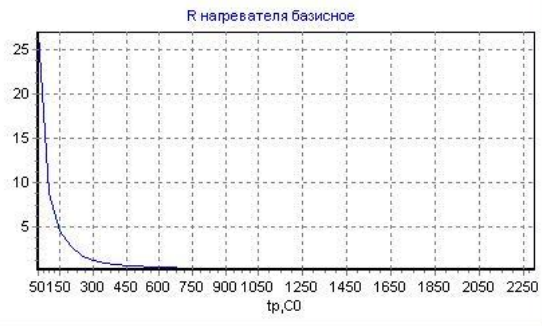
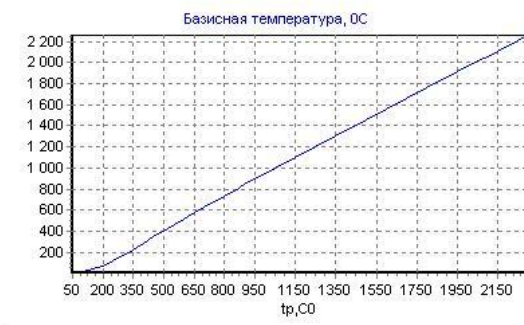
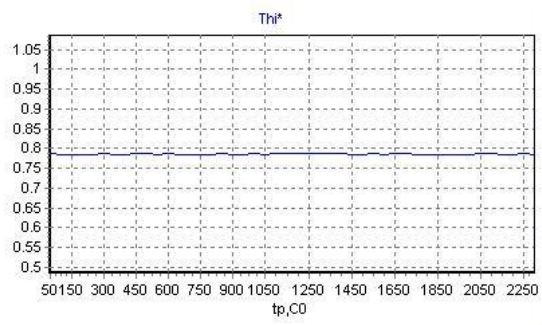
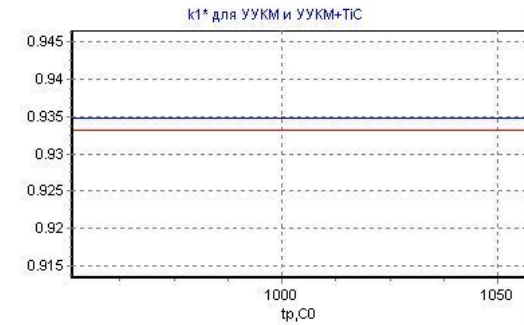
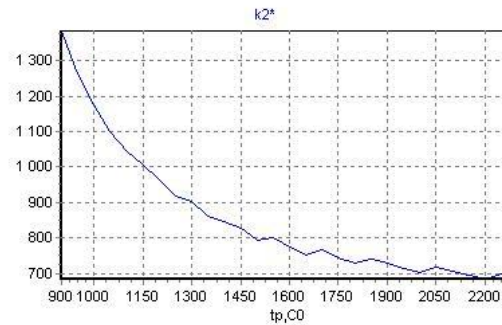
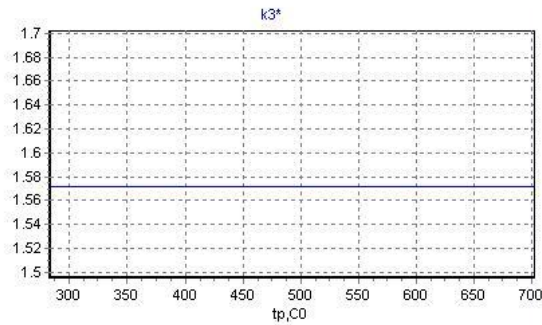
0.57 м

Толщина покрытия

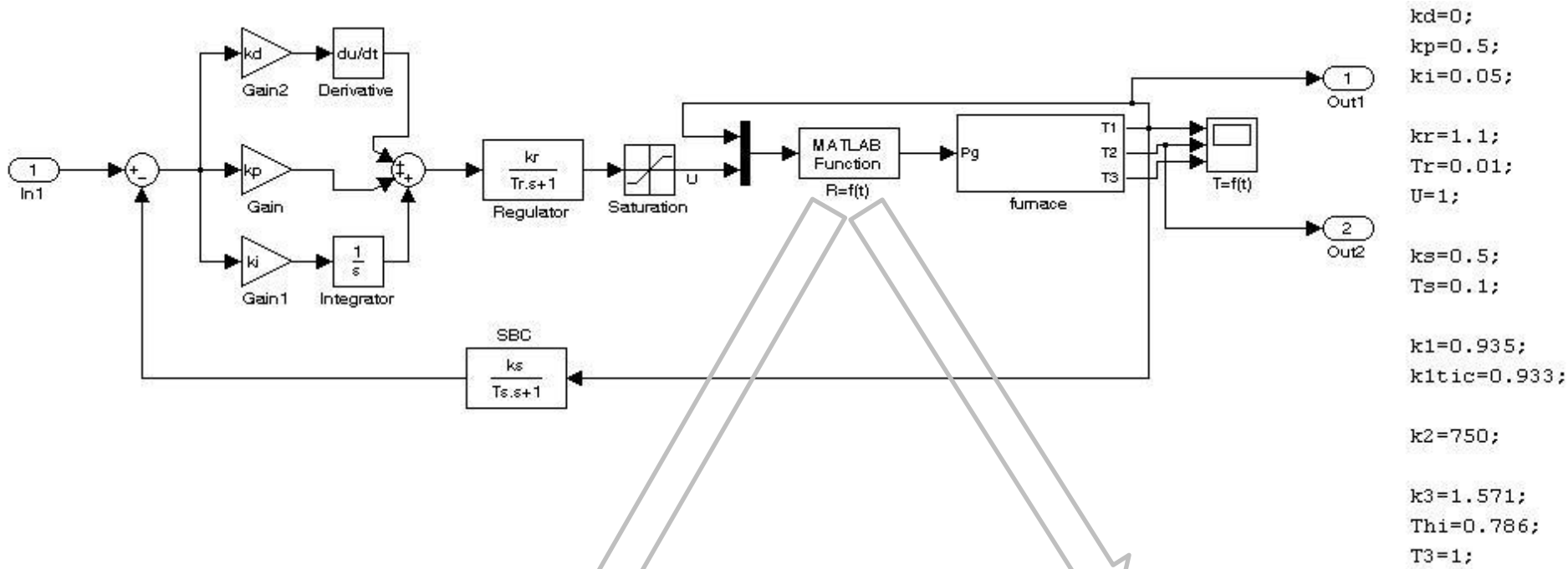
102

0.00006 м

Расчет



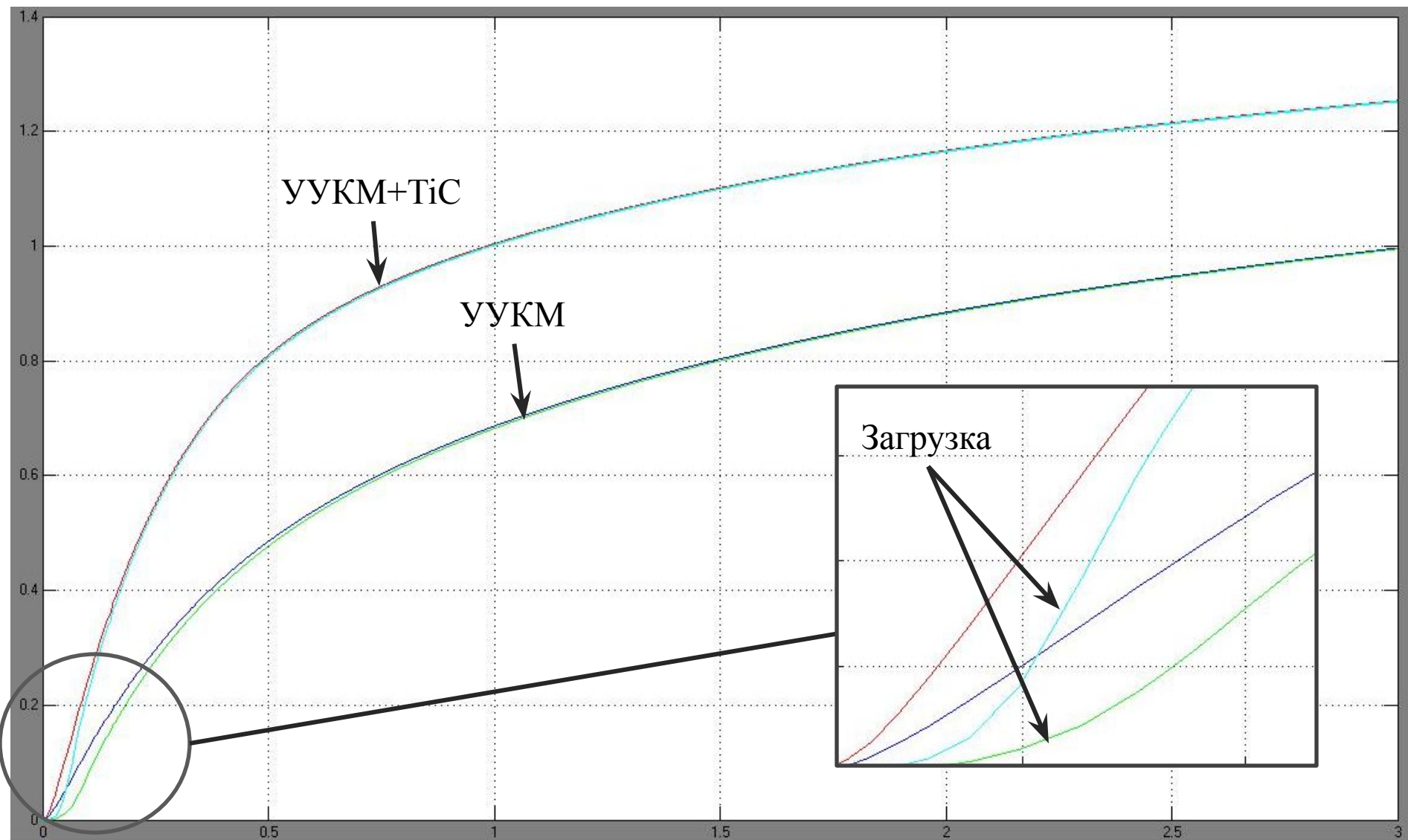
Система управления температурой



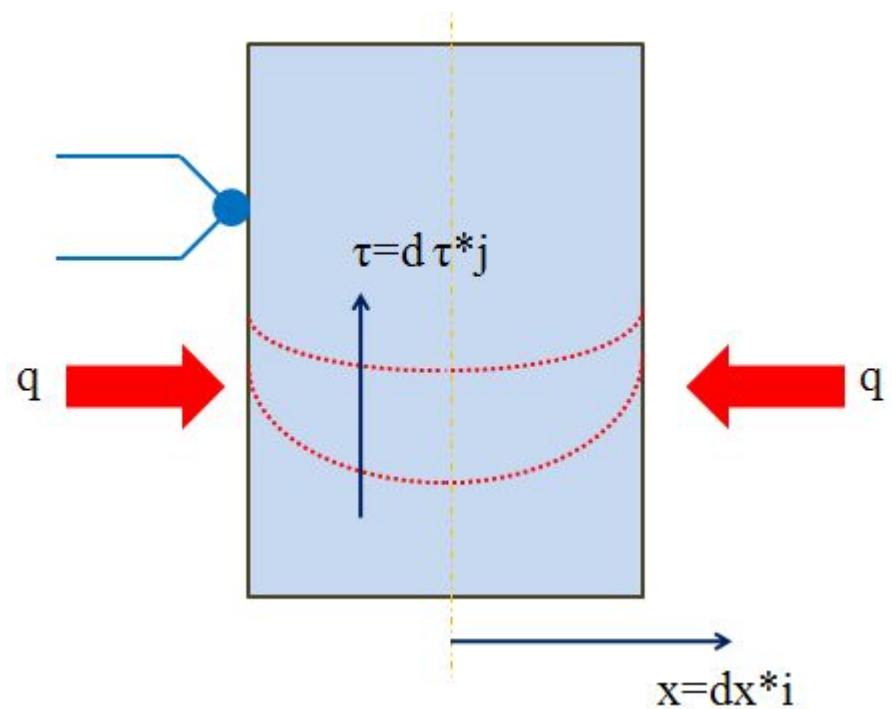
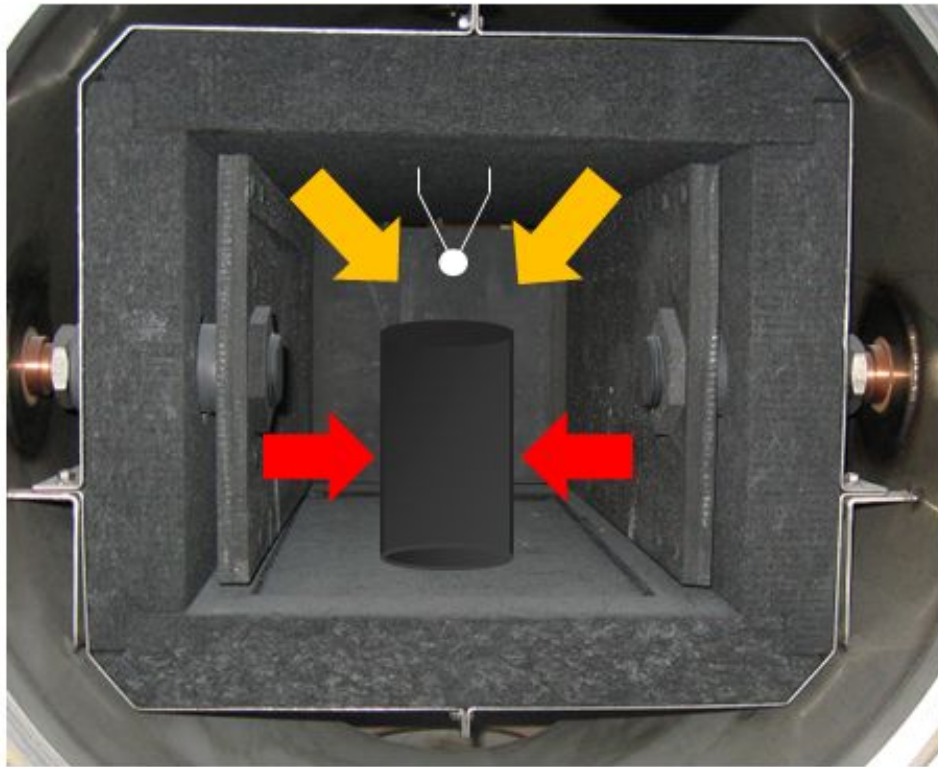
$$p(t) = 0.59, m = 0.067t,$$

$$w = \begin{pmatrix} 10 & 9.072 - \frac{36650}{T} \end{pmatrix} \times 10, \frac{\kappa_2}{M^2 \cdot c}$$

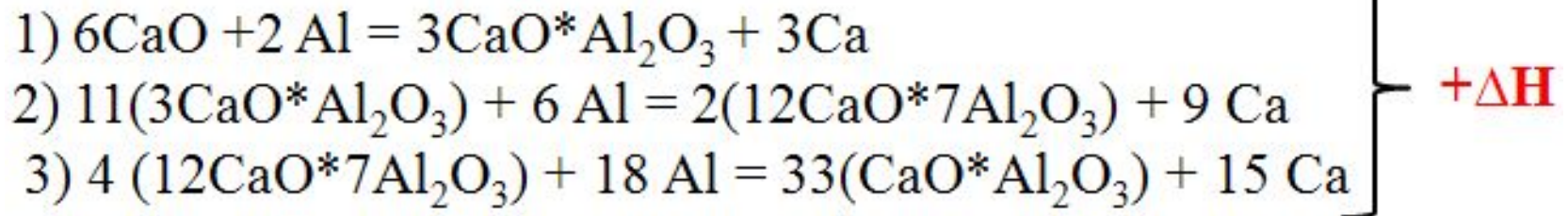
Результаты моделирования



Определение температурного поля внутри загрузки



Внутренние источники теплоты



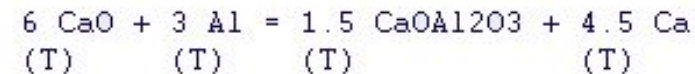
- properties of a species or chemical reaction

units: mole
 joule
 atm

temperature Kelvins: minimum: 300
 maximum: 2000
 step: 100

+ = +
 + = +

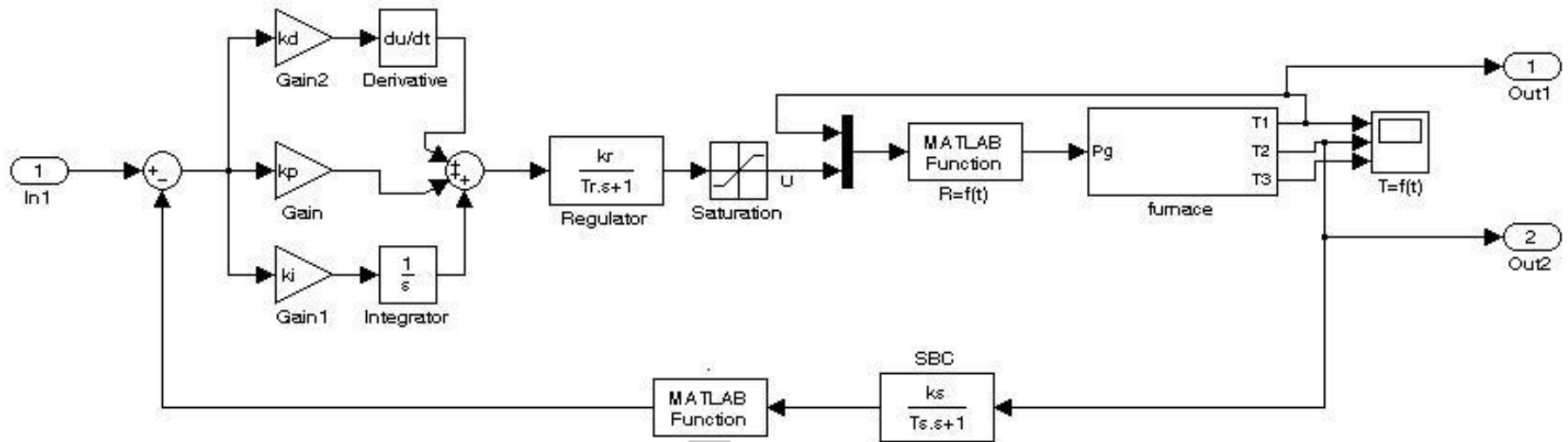
Chemical formulas are listed in [Compound-Web](#).



T(K)	Delta_H(J)
298.15	324303.3
300.00	324253.7
400.00	321476.0
500.00	318955.7
600.00	317058.7
700.00	315909.9
716.00	315796.9

• $H(T) = \Delta H(\text{formation}, 298.15 \text{ K}) + \int_{298.15}^T C_p \cdot dT$ [T = 298.15 to T]

Система управления температурой, учитывающая химические реакции, протекающие в загрузке



$$a \nabla^2 t + \frac{1}{\mu c} \frac{dH}{dt} = - \frac{\partial t}{\partial \tau}$$

Выводы

- Разработан способ получения защитных жаростойких покрытий на нагревателях, изготовленных из углерод – углеродного композиционного материала
- Проведены эксперименты по определению стойкости нагревателей при нагреве в воздухе до 1000°C
- Показано, что стойкость нагревателей с карбидными слоями при 700°C выше в 8-9 раз по сравнению с УУКМ, а при 1000°C в 2-3 раза
- Разработанный способ может быть использован для получения нагревательных элементов, способных работать в печах с восстановительной/окислительной атмосферой
- Разработана система управления температурой в вакуумной ЭПС, учитывающая влияние внутренних источников теплоты на изменение температурного поля внутри загрузки