



**Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет**

**614990 г., Пермь, Комсомольский проспект, 29
E-mail: alexkryukov@list.ru, malininvi@mail.ru**

Крюков А.Ю., Малинин В.И.

**ТЕРМОДИНАМИКА ЗОНЫ ПЛАМЕНИ
ОДИНОЧНЫХ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ
В КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ**

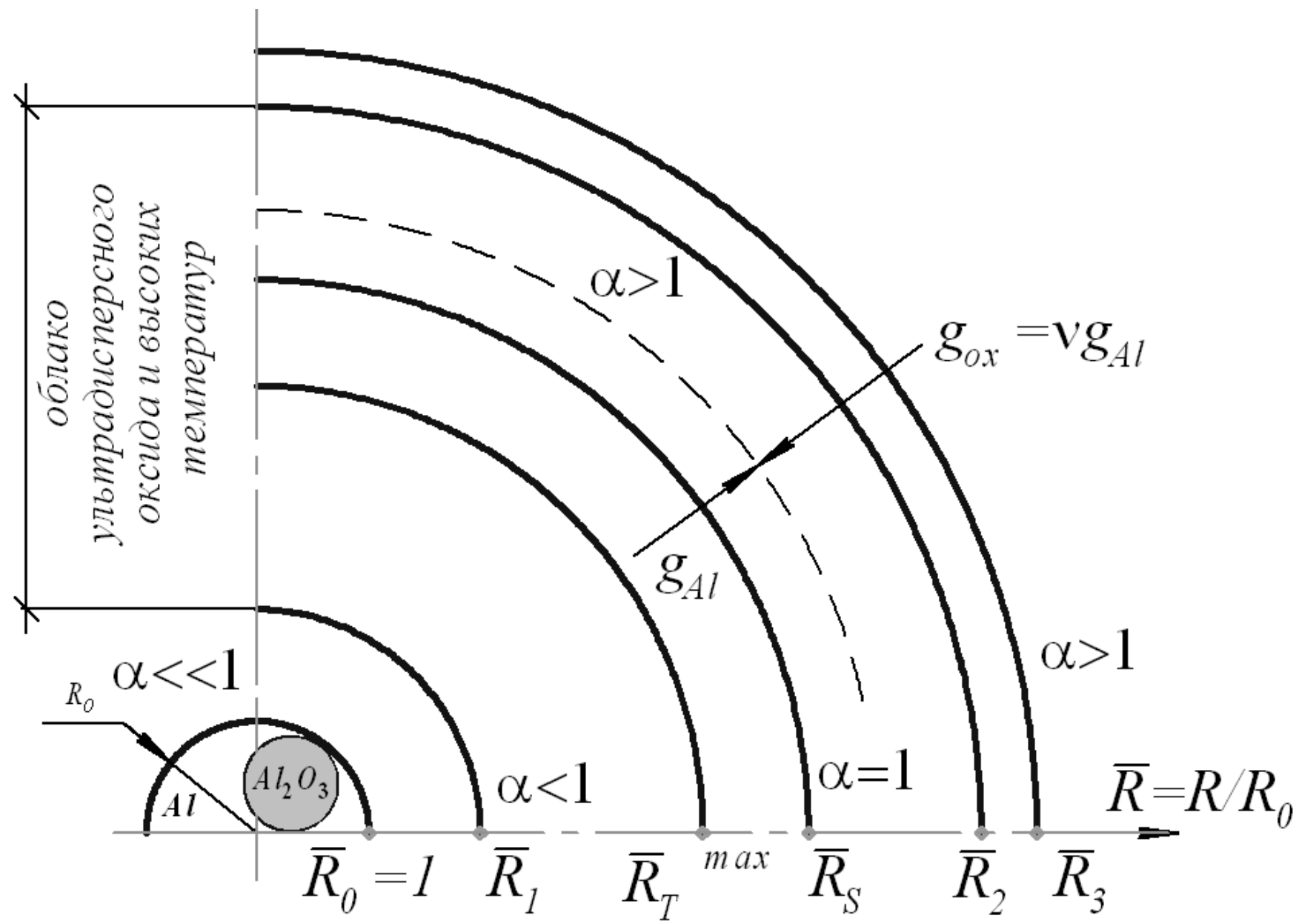
ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Термодинамический анализ параметров – температуры и концентраций окислительных компонентов – в пламени частиц алюминия и построение их распределения вдоль его радиуса с выделением характерных зон, определяемых процессами образования продуктов сгорания и тепло- и массообмена с окружающей средой для горения в атмосфере «79% Ar + 21% O_2 »

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

- 1) Разработка усовершенствованной физической модели горения одиночной частицы в условиях невесомости на основе выполненных ранее исследований и имеющихся экспериментальных данных.
- 2) Выявление зависимостей между термодинамическими параметрами пламени.
- 3) Построение математической модели горения частицы алюминия с учётом квазистационарности и равновесности процессов.
- 4) Расчёт зависимостей температуры пламени и концентрации окислителя от относительного радиуса (отношения сферической координаты R точек пламени к текущему радиусу частицы R_0) с учётом накопления оксида в зоне пламени для частиц исходного радиуса 50, 110 и 175 мкм.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦЫ Al



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ

Уравнения теплового баланса в каждой точке зоны пламени

$$-\lambda \frac{\partial T_f}{\partial \bar{R}} = \left([I(\bar{R}_T^{\max}) - I(\bar{R}_3)](C_\Sigma / C_{Al})_{av} - \int_{I(\bar{R}_3)}^{I(\bar{R})} (C_\Sigma / C_{Al}) dI \right) k_r g_{Al} \frac{R_0}{\bar{R}^2} \quad \bar{R} \geq \bar{R}_T^{\max}$$

$$\lambda \frac{\partial T_f}{\partial \bar{R}} = k_r g_{Al} \frac{R_0}{\bar{R}^2} \int_{I(\bar{R})}^{I(\bar{R}_T^{\max})} (C_\Sigma / C_{Al}) dI \quad \bar{R} < \bar{R}_T^{\max}$$

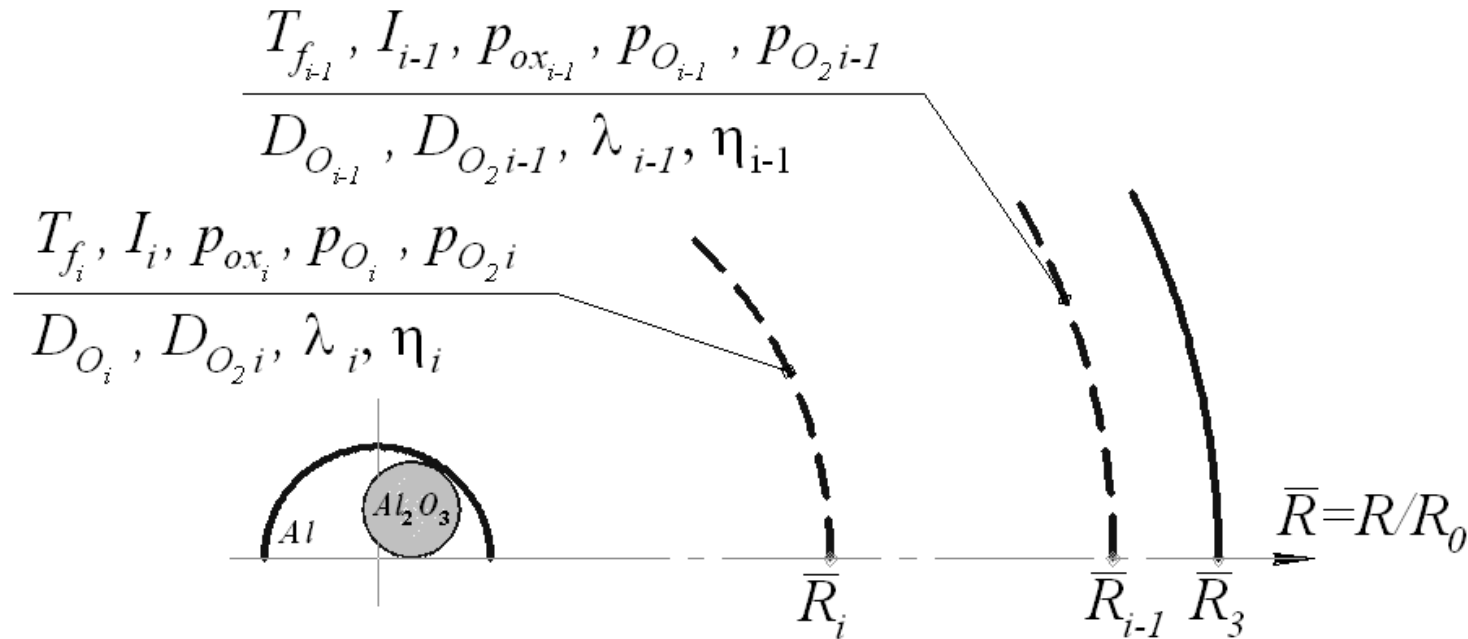
$$g_{Al} = \frac{g_{Al}^* R_0^*}{R_0}$$

Уравнения баланса массы окислителя в каждой точке зоны пламени

$$-\left(D_{O_2} \frac{\partial p_{O_2}}{\partial \bar{R}} + 0,5 D_O \frac{\partial p_O}{\partial \bar{R}} \right) / (R_g T_f) = \nu g_{Al} \frac{R_0}{\bar{R}^2} \quad \alpha \geq 1$$

$$-\left(D_{O_2} \frac{\partial p_{O_2}}{\partial \bar{R}} + 0,5 D_O \frac{\partial p_O}{\partial \bar{R}} \right) / (R_g T_f) = \nu g_{Al} \alpha \frac{R_0}{\bar{R}^2} \quad \alpha < 1$$

СХЕМА РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ В ЗОНЕ ПЛАМЕНИ



Уравнения баланса для численного расчёта параметров

$$-\lambda(T_{f_{i-1}} - T_{f_i}) \frac{(\bar{R}_{i-1}/\bar{R}_i)(\bar{R}_i/\bar{R}_0)}{R_0^*(\bar{R}_{i-1}/\bar{R}_i - 1)} = k_r g_{Al} \left(Q - \sum_{i=0}^N C_{\Sigma_i} / C_{Al_i} (I_i - I_{i-1}) \right)$$

$$- \rho_{O_{2i,i-1}} (p_{O_{2i-1}} - p_{O_{2i}}) + 0,5 D_{O_{i,i-1}} (p_{O_{i-1}} - p_{O_i}) \frac{-(\bar{R}_{i-1}/\bar{R}_i)(\bar{R}_i/\bar{R}_0)}{R_0^*(\bar{R}_{i-1}/\bar{R}_i - 1) \bar{T}_f R_g} = \nu g_{Al}$$

$$- \rho_{O_{2i,i-1}} (p_{O_{2i-1}} - p_{O_{2i}}) + 0,5 D_{O_{i,i-1}} (p_{O_{i-1}} - p_{O_i}) \frac{-(\bar{R}_{i-1}/\bar{R}_i)(\bar{R}_i/\bar{R}_0)}{R_0^*(\bar{R}_{i-1}/\bar{R}_i - 1) \bar{T}_f R_g} = \nu g_{Al} \alpha$$

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ РАСЧЁТА И ПАРАМЕТР η

Новый параметр η определяет степень превращения металла в конденсированный оксид:

$$\eta = Z_{th} / Z_{th}^{\max} = f(T_f, C_{ox})$$

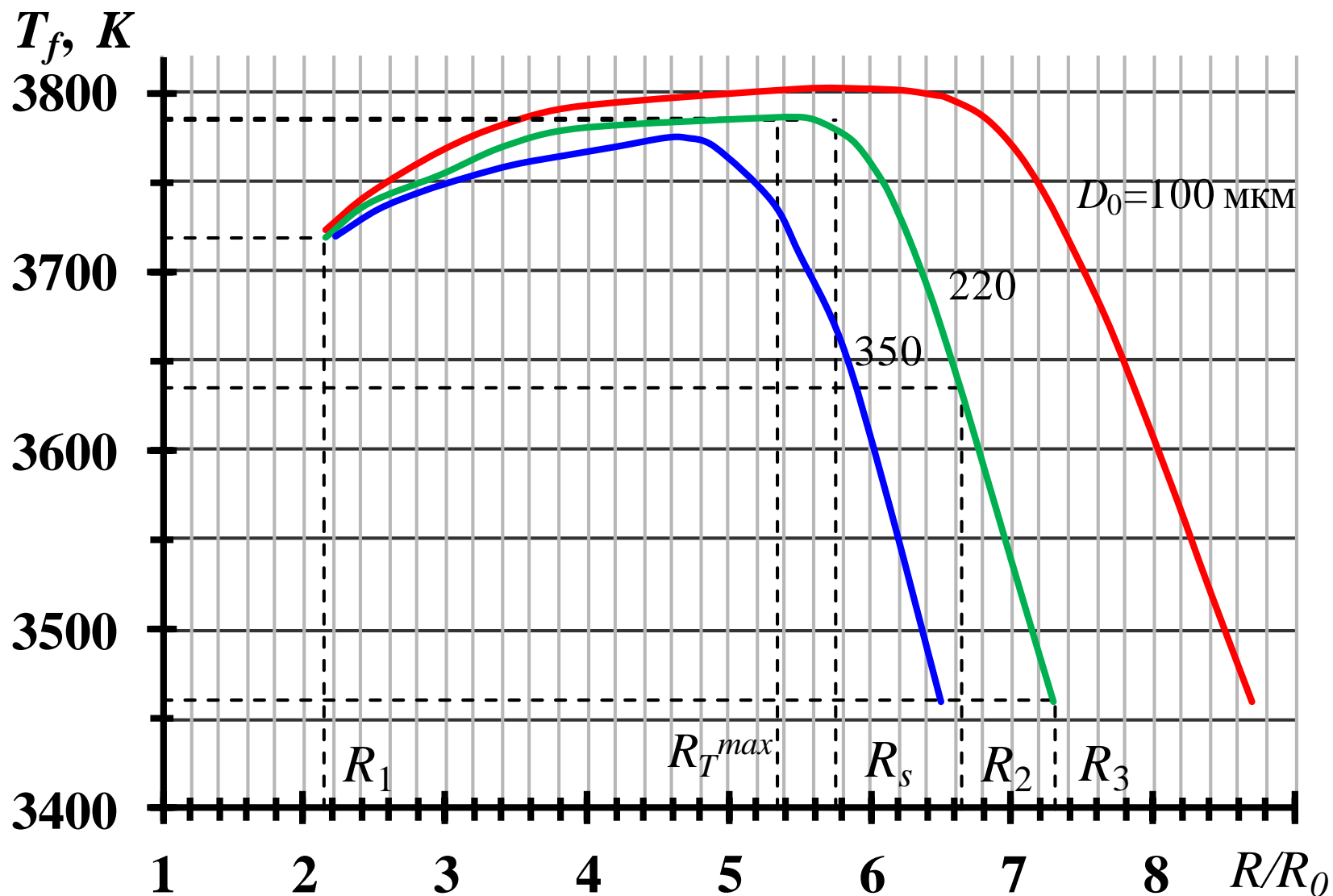
Z_{th} – значение доли оксида, которое может образоваться при данных параметрах газовой фазы, рассчитанное по равновесной термодинамике без учёта накопления конденсированной фазы;

Z_{th}^{\max} – максимально возможная величина доли конденсированного оксида, которая может образоваться, без учёта накопленного Al_2O_3

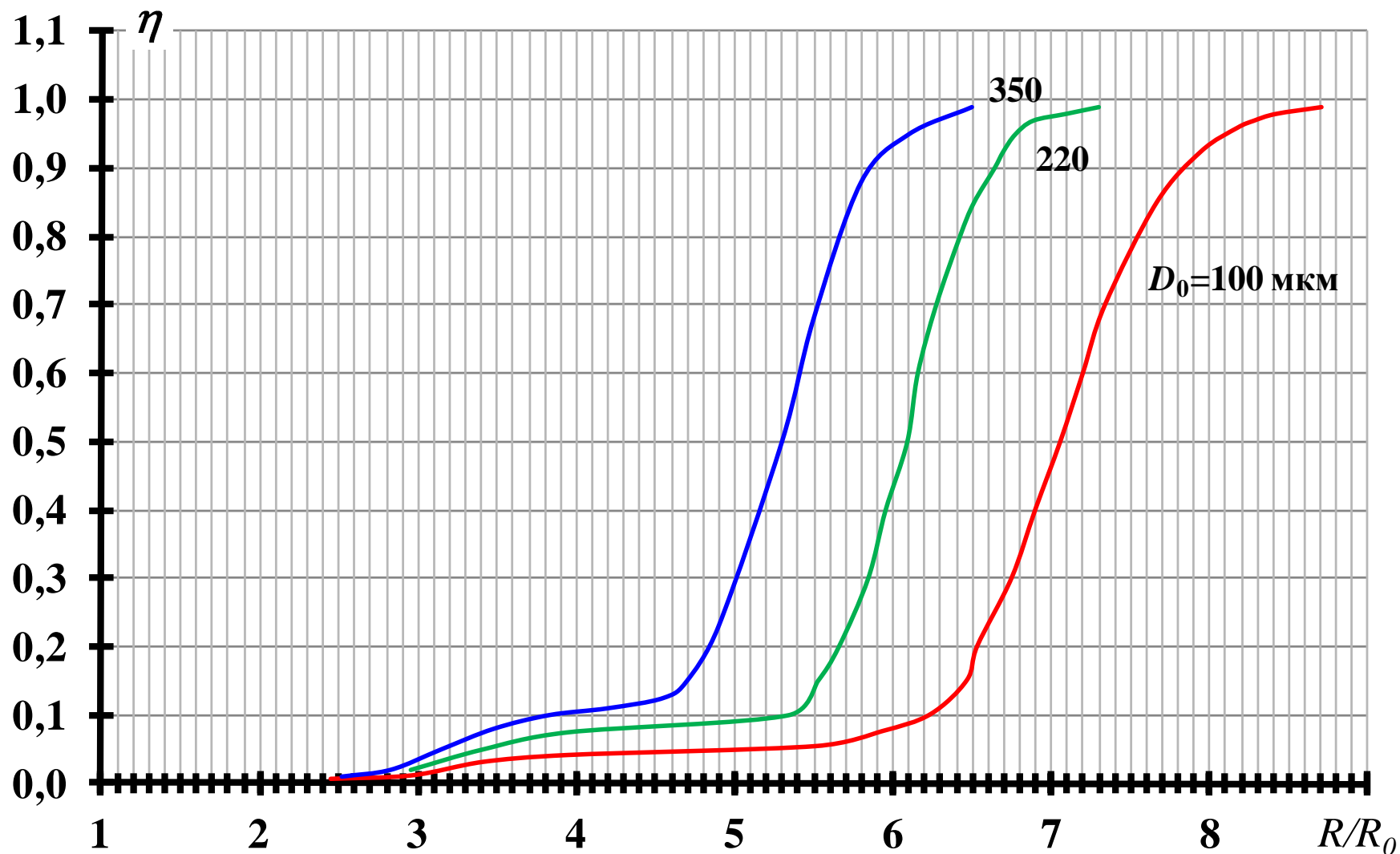
Вся область пламени разбивается на отдельные участки, на границах которых задана величина η и рассчитываются термодинамические параметры. Решение для каждой новой относительной координаты \bar{R}_i получается с помощью решения, полученного на предыдущем шаге.

Задача решалась методом последовательных приближений путём баланса потоков окислителя и тепла для данной точки – координаты \bar{R}_i пламени – за счёт изменения её значения.

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ ОТ ЕГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАДИУСА И ИСХОДНОГО РАЗМЕРА ЧАСТИЦЫ



ЗАВИСИМОСТЬ СТЕПЕНИ ПРЕВРАЩЕНИЯ АЛЮМИНИЯ В КОНДЕНСИРОВАННЫЙ ОКСИД ОТ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАДИУСА ПЛАМЕНИ И ИСХОДНОГО РАЗМЕРА ЧАСТИЦЫ



ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполненный анализ показывает, что равновесная термодинамика пламени обязательно должна учитываться для адекватного описания его параметров и их взаимосвязей с размером характерных зон.

2. В результате совместного применения термодинамического анализа и уравнений, описывающих теплообмен и массообмен в зоне пламени частицы алюминия, получены зависимости, отражающие распределение параметров – температуры и степени превращения алюминия в конденсированный оксид при горении в среде «79% Ar + 21% O_2 » для частиц начальным диаметром 100, 220 и 350 мкм.

3. Установлены зоны, где основная часть алюминия превращается в конденсированный оксид. Соответственно, в этих же зонах находится и большая часть оксида, что соответствует экспериментальным данным. Относительный радиус начала зон, содержащих большую часть Al_2O_3 , существенно отличается для каждого исходного размера частиц, и уменьшается с возрастанием их начального размера.

4. Перспективы продолжения исследований, начатых в настоящей статье, – выполнение расчётов по предложенной методике для горения частиц алюминия в средах «79% N_2 + 21% O_2 » и «79% He + 21% O_2 », в том числе, при различных значениях давления окружающей среды и учёте реакции азотирования.