



Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Кафедра А-3: Космические аппараты и двигатели

ПРОБЛЕМА ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ОПИСАНИЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Бабук В.А.
Будный Н.Л.
Куклин Д.И.
Низяев А.А.

Санкт-Петербург
2022 г.

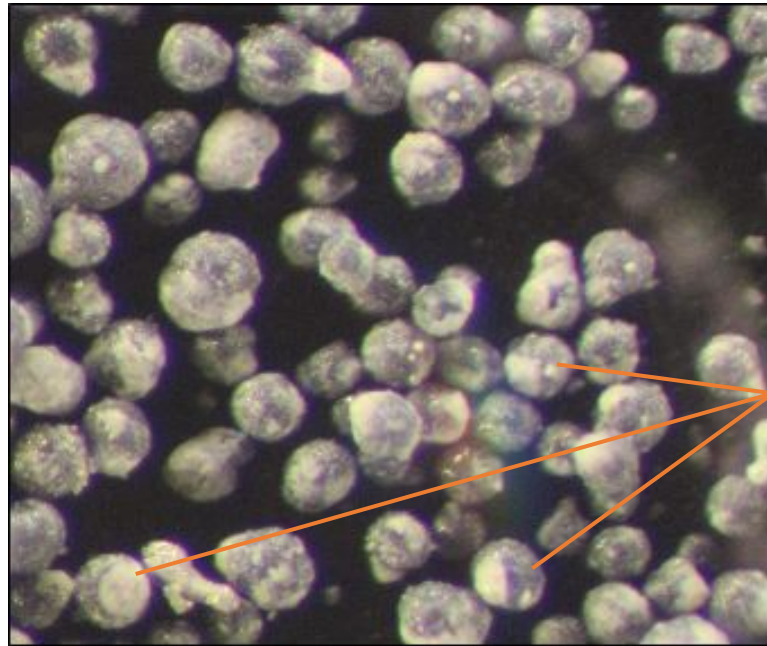
Поток продуктов сгорания

Газообразные продукты
сгорания

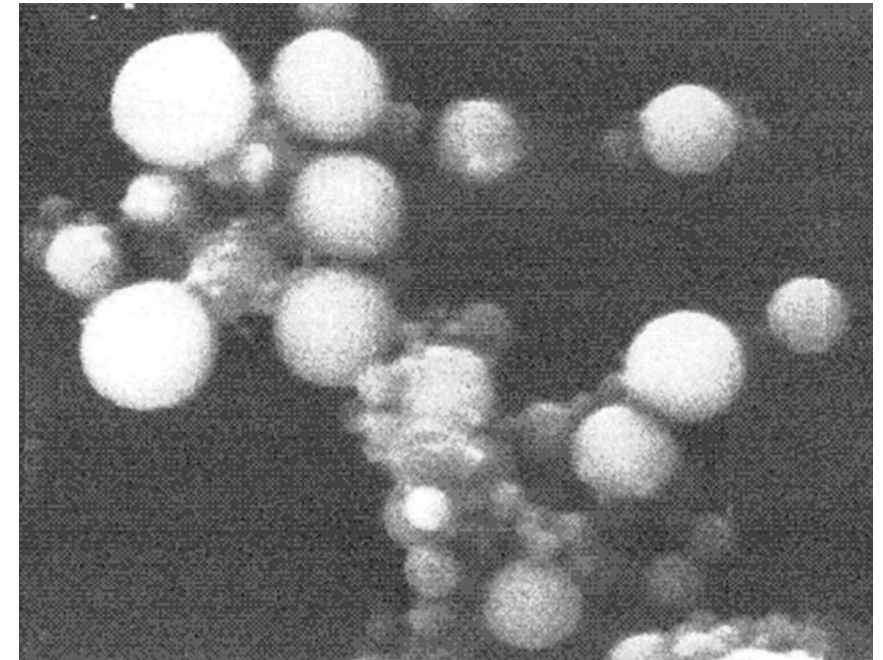
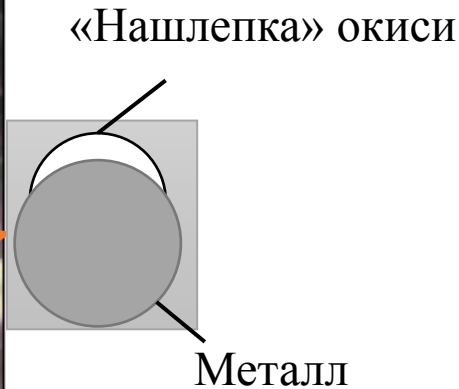
Конденсированные продукты горения

Агломераты

Высокодисперсный
оксид (ВДОК)



300 мкм

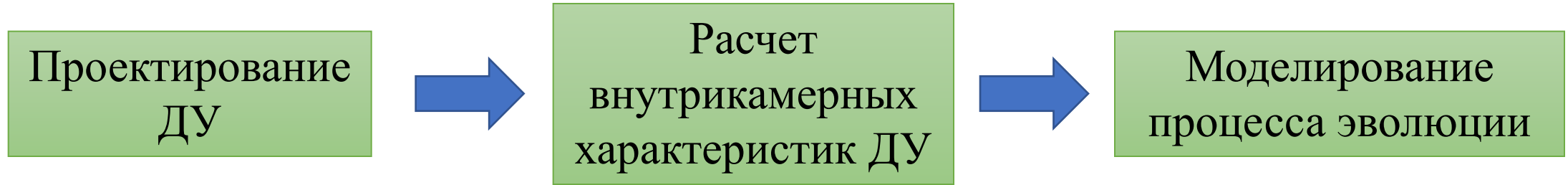


1 мкм

Рисунок 1 – Визуализация агломератов
(Бабук В.А. и др.)

Рисунок 2 – Визуализация частиц ВДОК
(Бабук В.А., и др.)

Предпосылки исследования



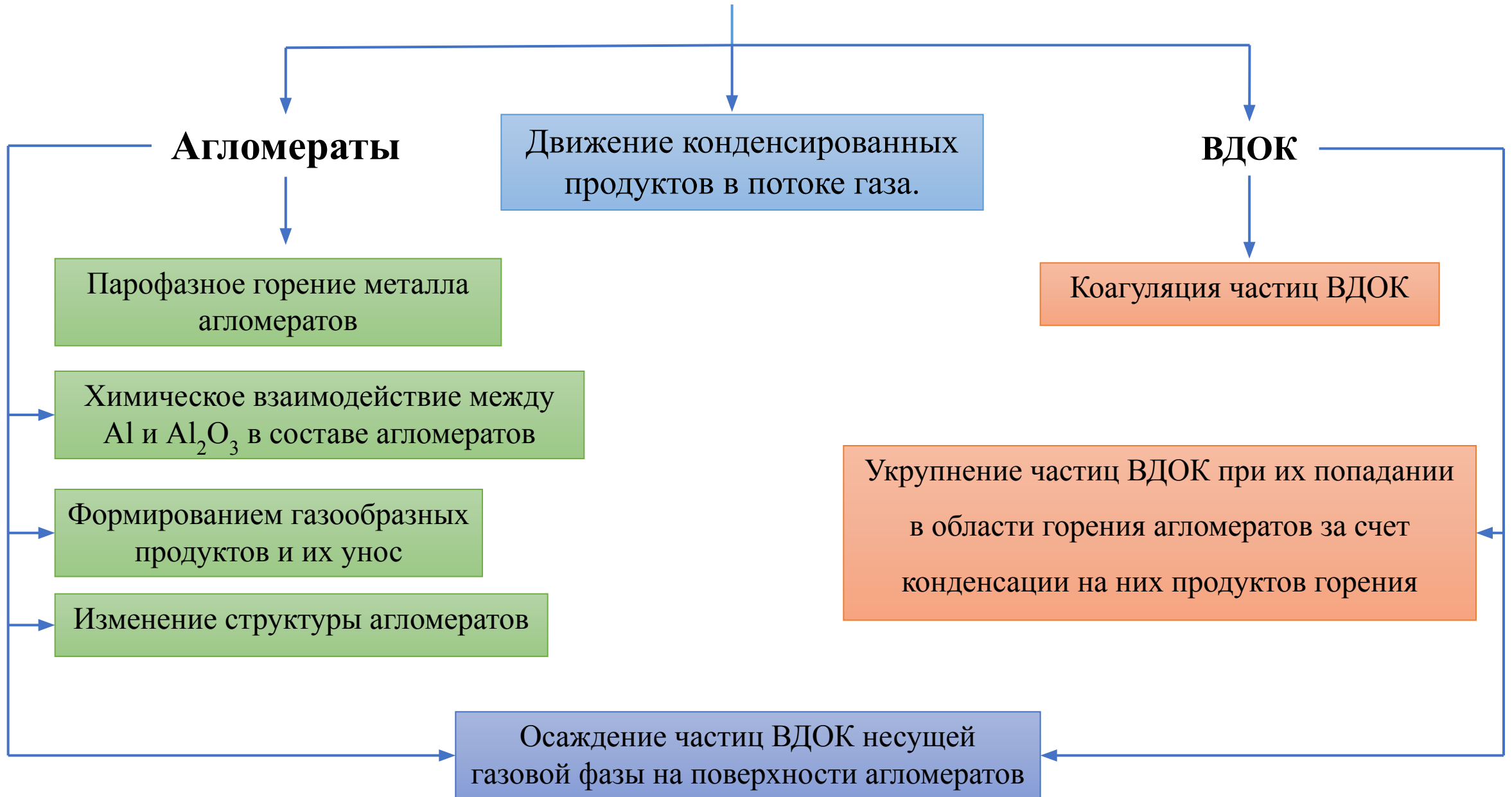
Цель исследования:

Определить соотношение между ламинарным и турбулентным режимами течения в камере сгорания

Содержание исследования:

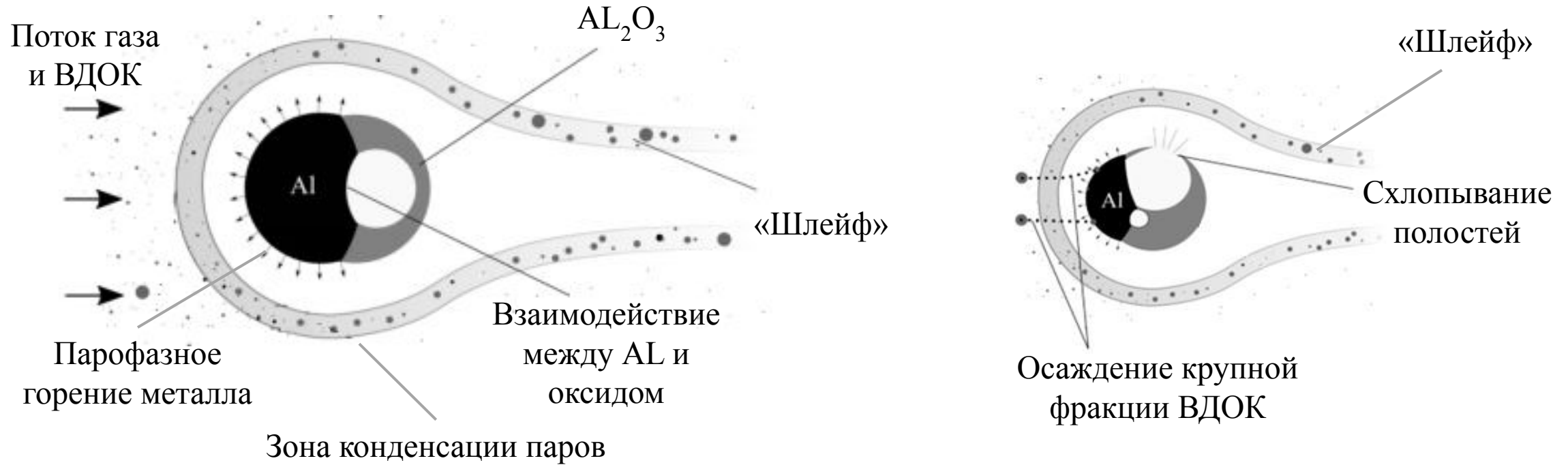
Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

Процесс эволюции продуктов сгорания



Эволюция КПП

Агломераты



ВДОК



Рисунок 3 – Схема процесса эволюции КПП
(Бабук В.А. и др.)

Методика проведения экспериментов

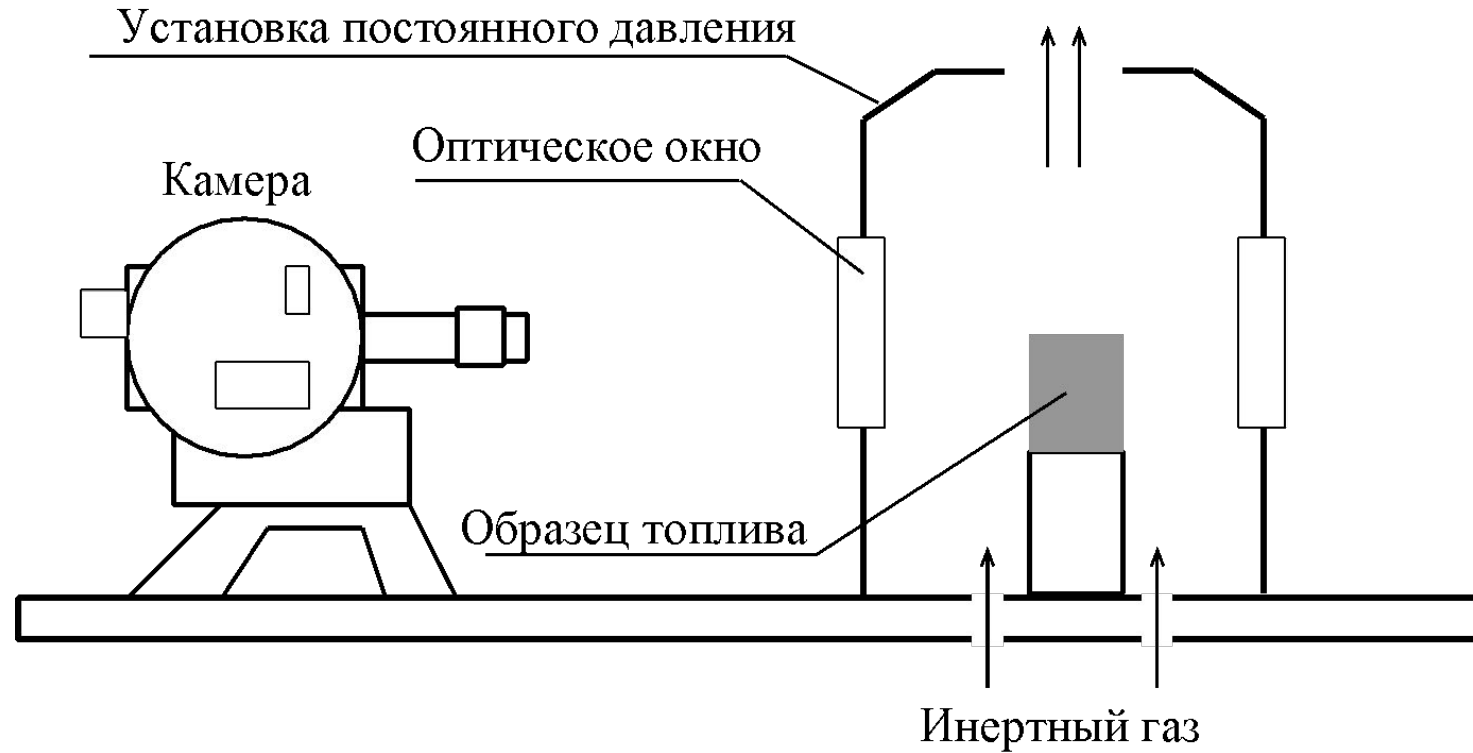
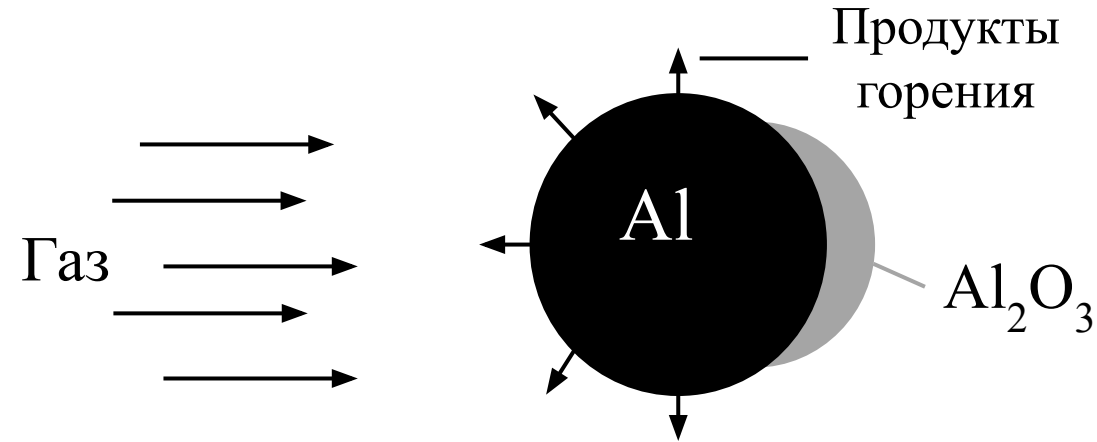


Рисунок 4 - Схема
визуализации частиц КПГ
(Бабук В.А. и др.)

Численное моделирование

(математическая модель)



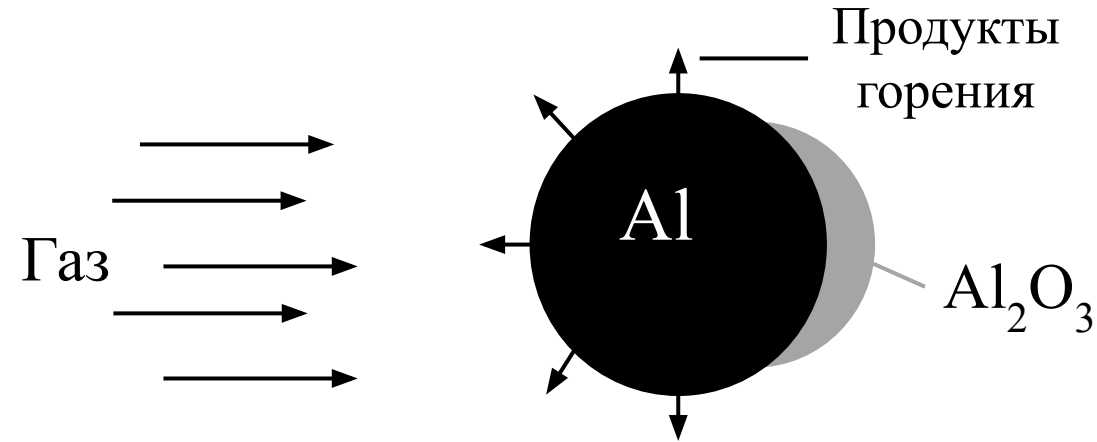
Математическая модель:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} = 0$$

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_x}{\partial r} \right)$$

$$v_x \frac{\partial v_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right)$$

Численное моделирование (граничные условия)



Граничные условия:

- **внешний поток:** невозмущен;
- **скорость внешнего потока:** равна скорости обдува агломерата;
- **поверхность капли алюминия:** отток газа, направленный по нормали к поверхности;
- **поверхность оксида:** непроницаемая стенка.

Сравнение результатов

(агломераты)

Горения агломерата

Эксперимент

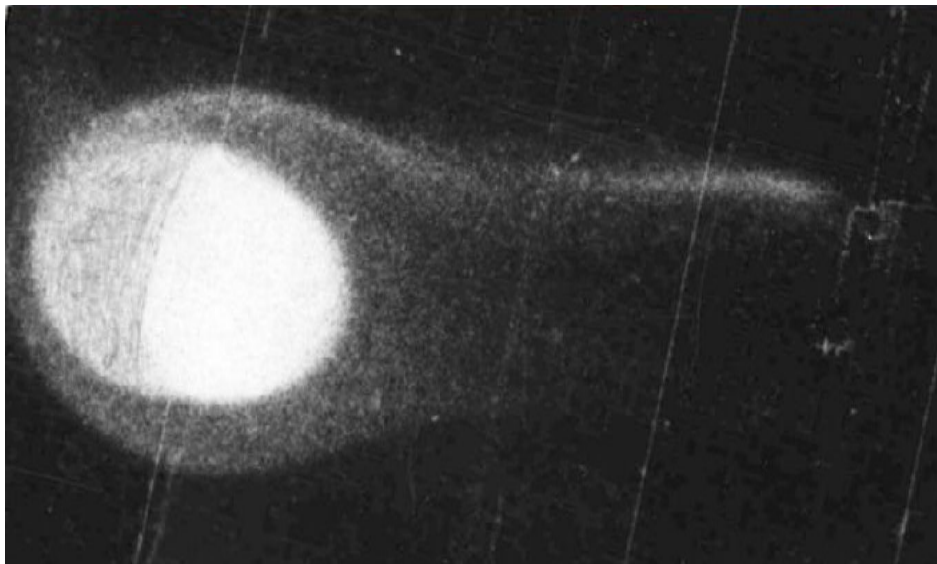


Рисунок 5 – Визуализация процесса эволюции агломерата

Расчет

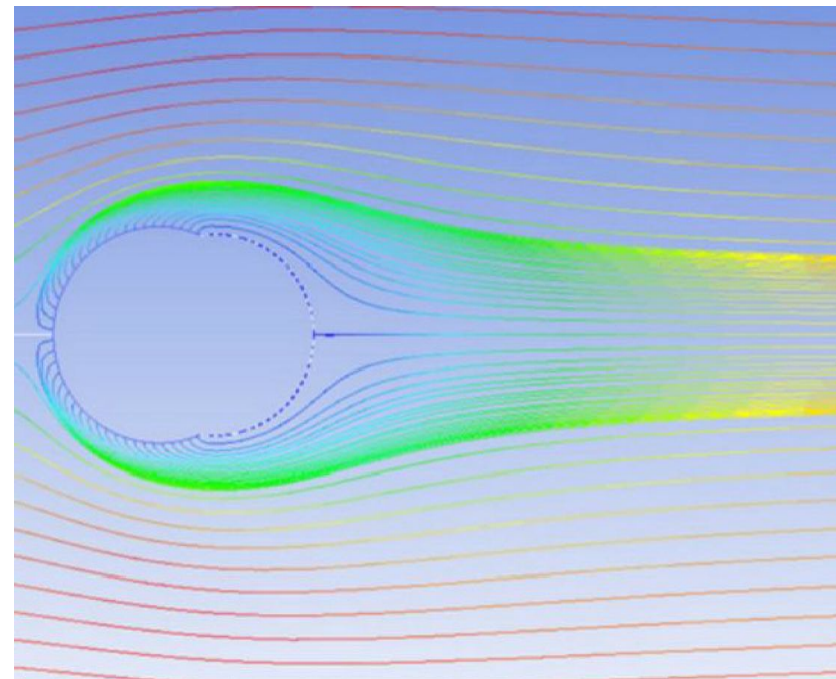


Рисунок 6 – Результат расчета обтекания агломерата

Модель горения металла агломератов

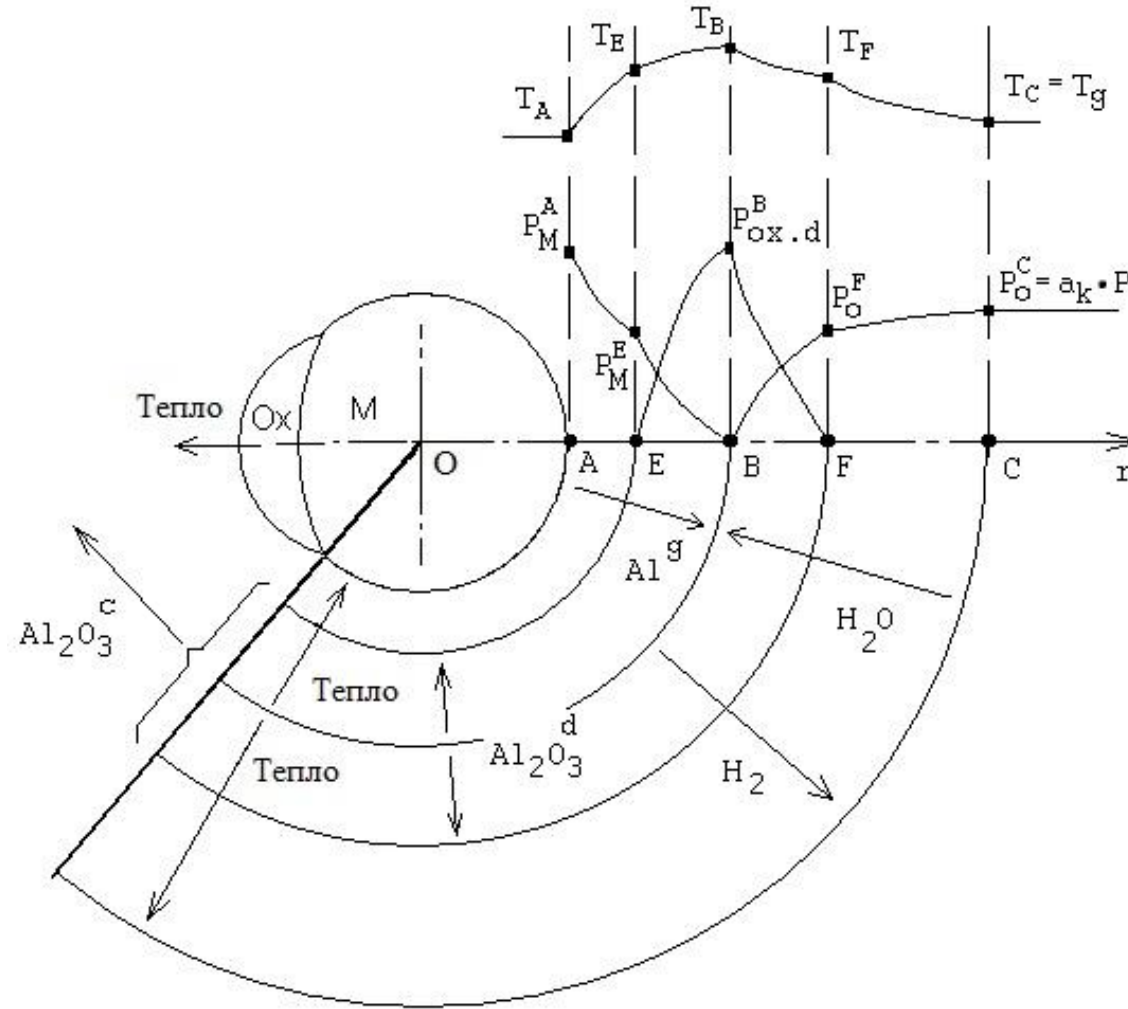
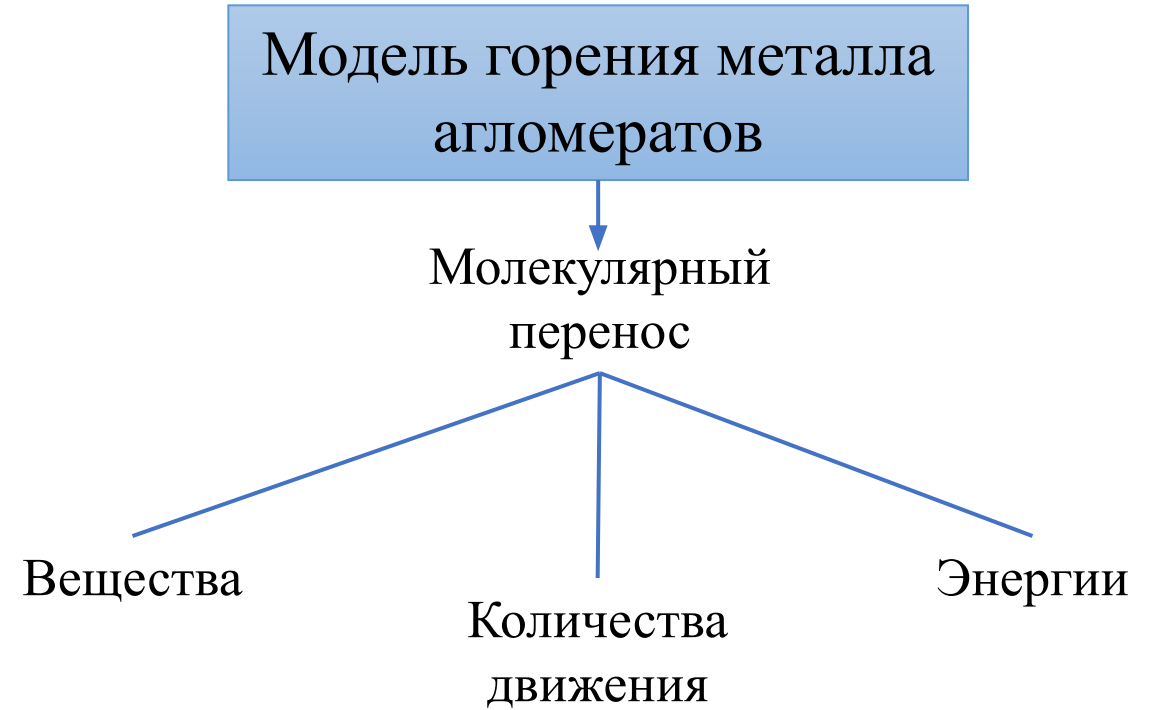
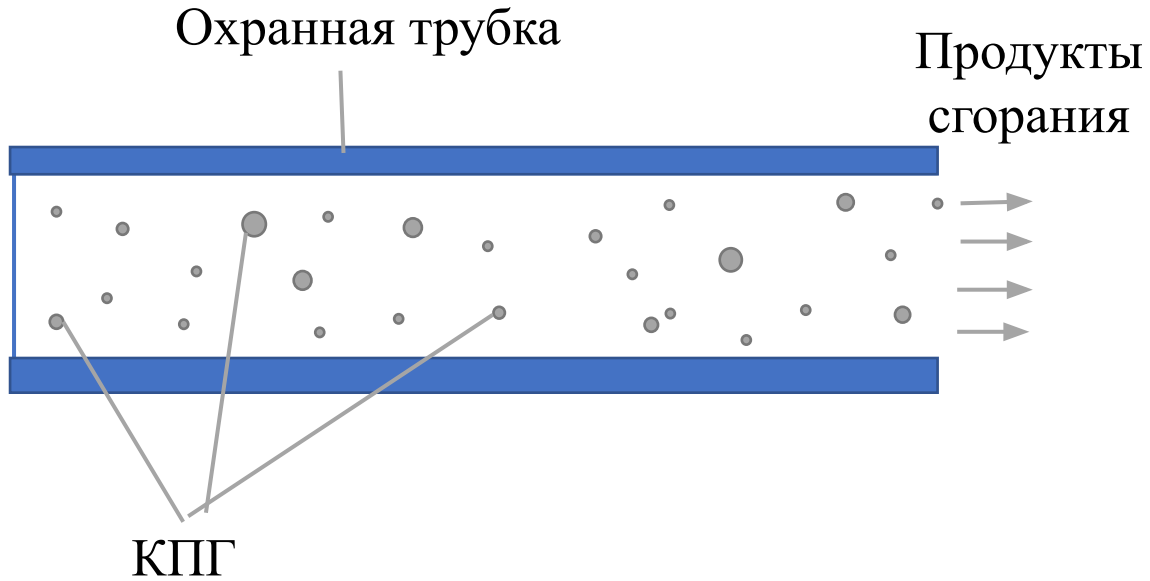


Рисунок - Схема области горения в рамках модели
газофазного горения в металла агломератов

Модель эволюции агломератов



Сравнение результатов (агломераты)

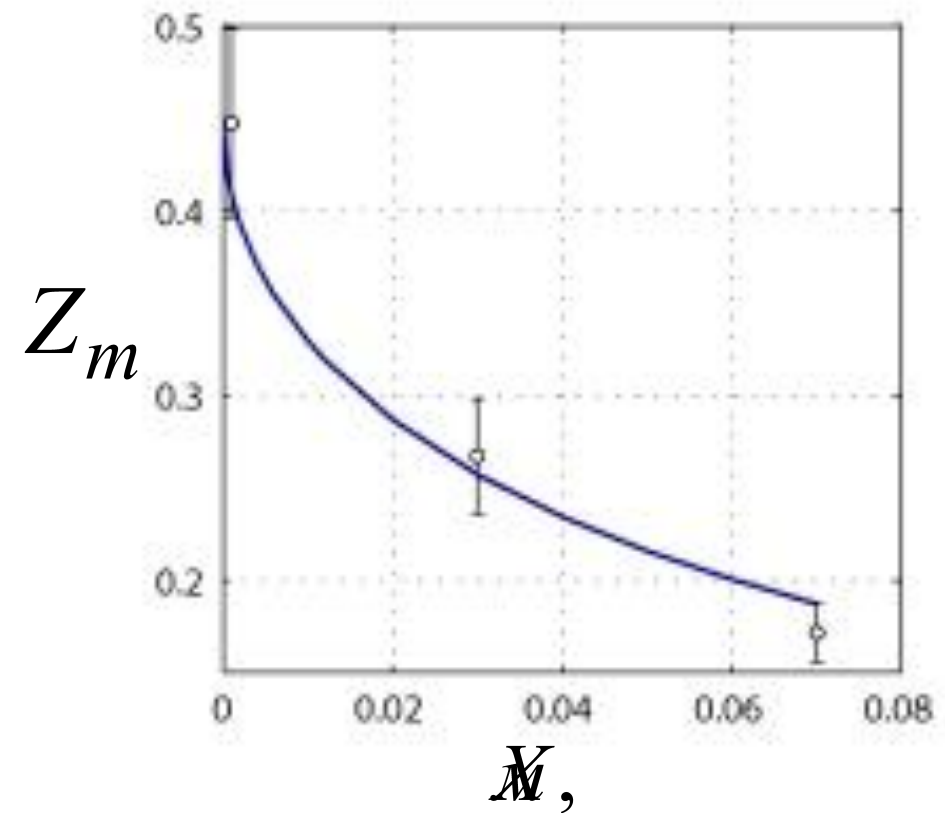
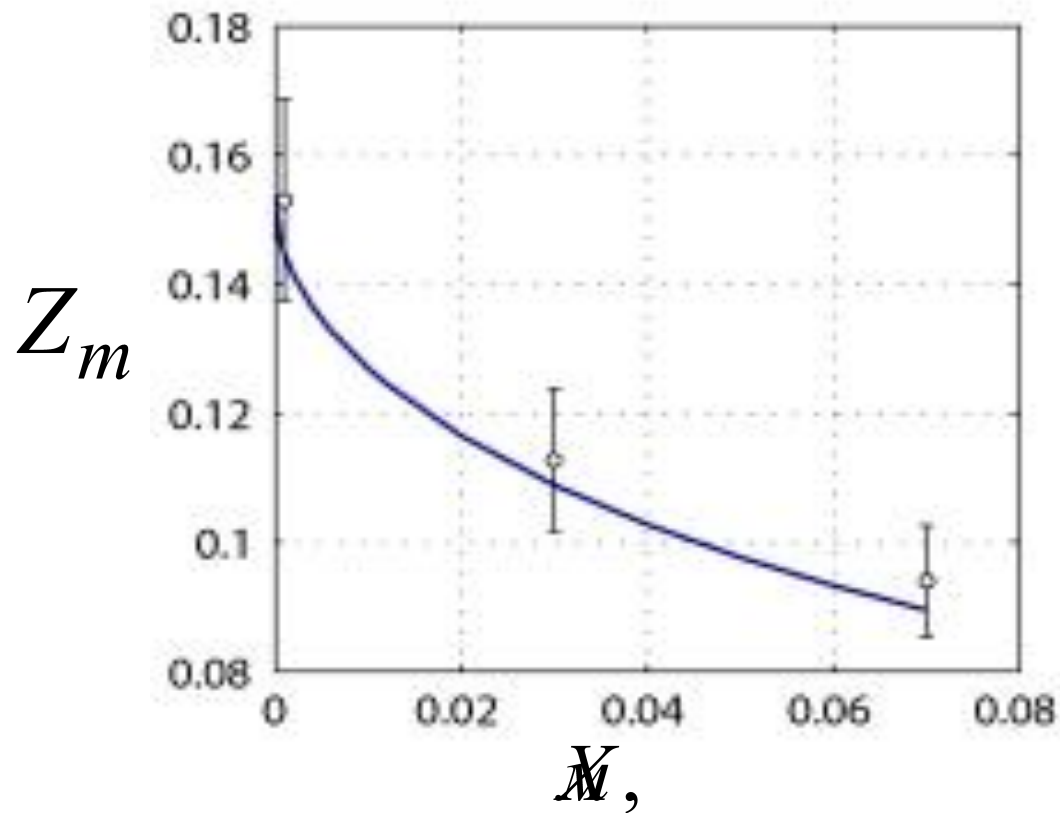


Рисунок 7 – Зависимость доли исходного металла топлива в составе агломератов - Z_m от пространственной координаты.

Обтекание агломератов

Течение в объеме камеры сгорания

Большое поперечное
сечение камеры
сгорания



Неустойчивость
течения



Турбулентный
режим течения

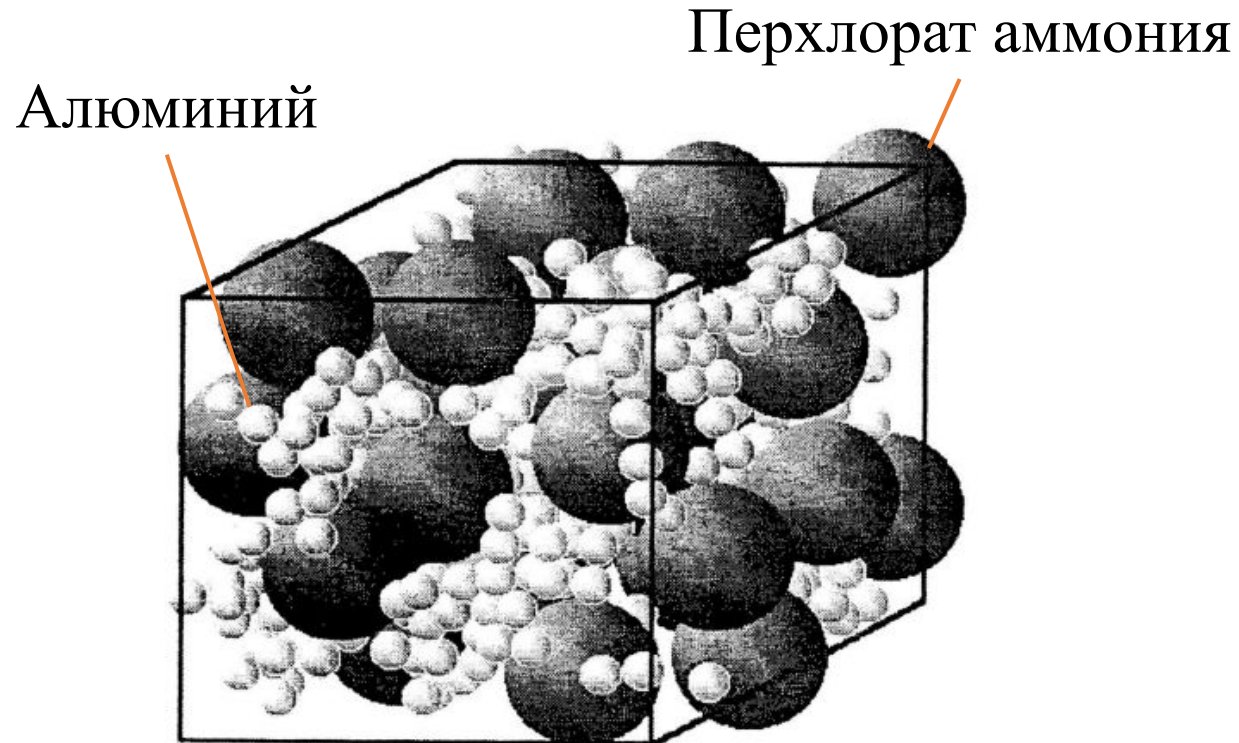
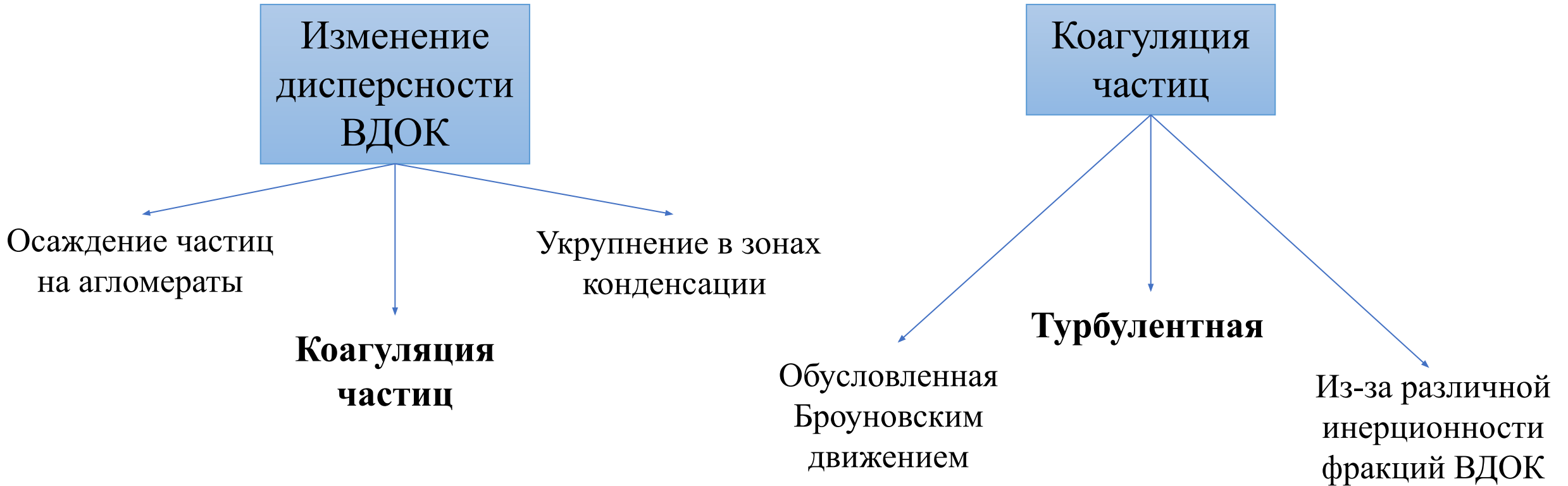


Рисунок 8 – Структура твердого
топлива

Модель эволюции ВДОК



Сравнение результатов (ВДОК)

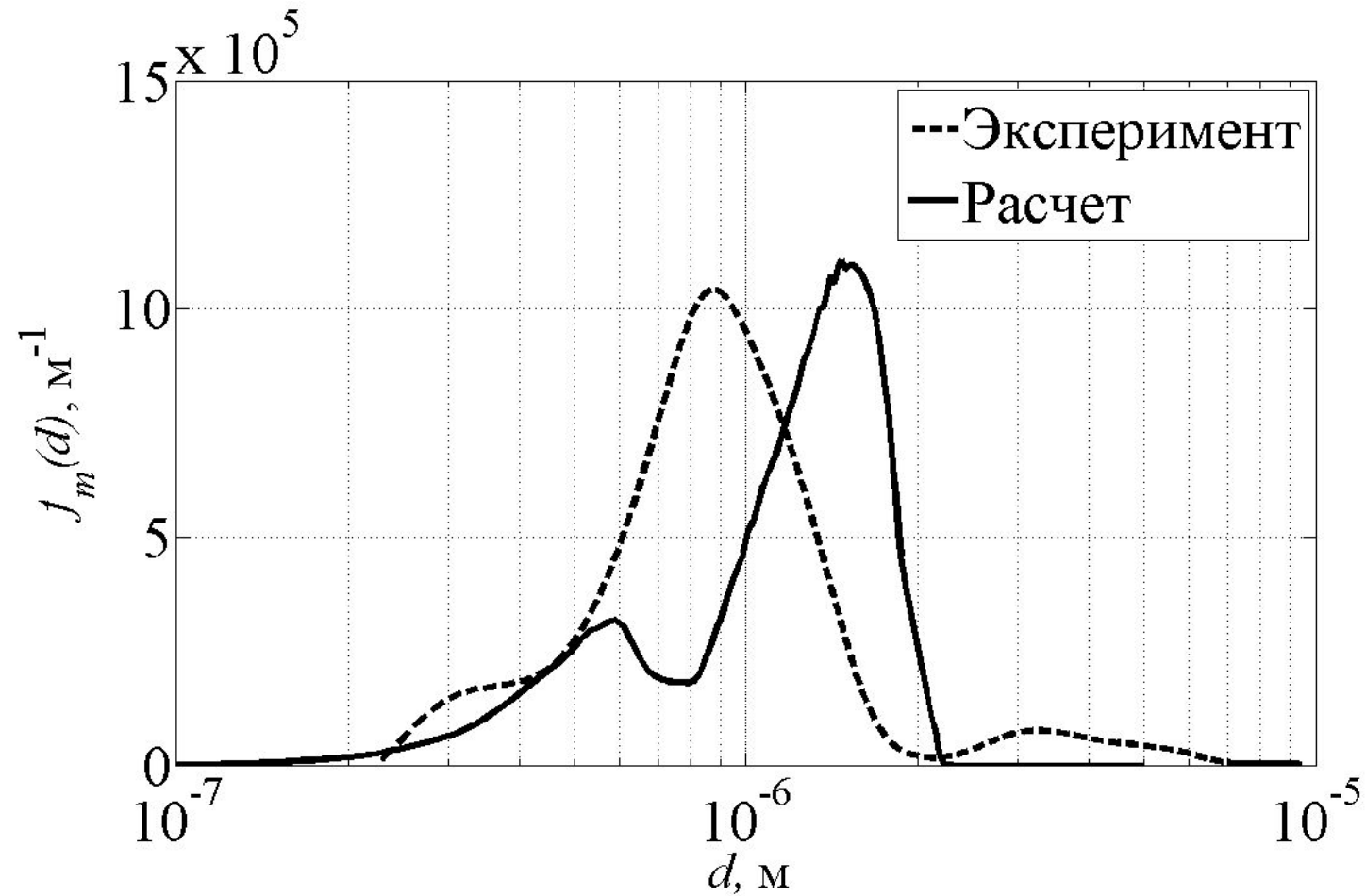


Рисунок 9 - Массовые функции плотности распределения частиц ВДОК по размерам ($f_m(d)$) на выходе из охранной трубки

Течение в объеме камеры

Заключение

- При обтекании агломератов режим течения близок к ламинарному
- Применительно к течению в объеме камеры сгорания – турбулентному
- Полученные результаты имеют существенное значение для создания правомерного описания внутрикамерных процессов

Спасибо за внимание!