

# Исследование движения и свойств магнезита в многоподовой печи

XXI Конференция огнеупорщиков  
и металлургов, МИСиС, май 2024 г

Борзов Андрей Николаевич

к.т.н., инженер – технолог



# 1

## анализ решения задачи движения материала

- ▶ общие сведения
- ▶ принцип работы
- ▶ входные и выходные параметры обжига
- ▶ явления, происходящие в печи
- ▶ варианты описания движения материала в многоподовой печи

# 2

## математическое моделирование движения материала по варианту 1

- ▶ постановка задач
- ▶ мини тестовые испытания движущегося материала
- ▶ структура мат модели и вариационные параметры
- ▶ аналогичность протекания процесса в мини тестах и мат.модели

# 3

## результаты расчетов

- ▶ реализация полученной структуры мат модели в разных программах
- ▶ скорость расчета мат модели в разных программах
- ▶ объем данных результатов расчета
- ▶ анализ движения материала на поду печи
- ▶ анализ распределения слоя материала на поду печи

# 4

## выводы

- ▶ анализ модельных решений
- ▶ рекомендации по построению вычислений для всей многоподовой печи
- ▶ благодарности



# 1

## анализ решения задачи движения материала



Многоподовая печь Бета Рекорд 100-2, Комплекс плотноспеченных порошков Рекорд. Саткинская производственная площадка Группы Магнезит



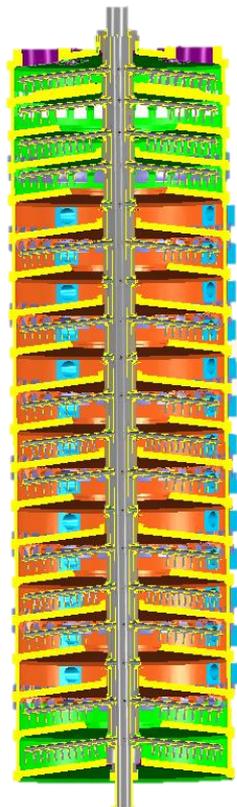
## общие сведения

### параметры печи

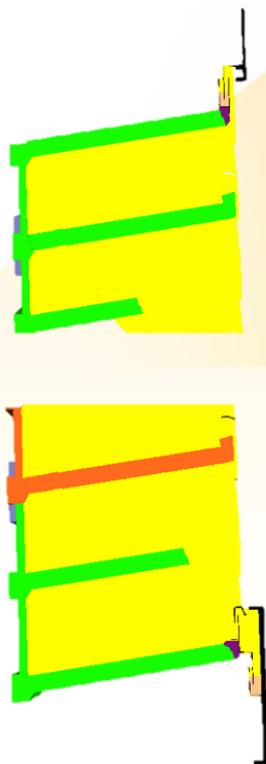
- |                      |                     |
|----------------------|---------------------|
| ▶ высота             | 24300 мм            |
| ▶ диаметр            | 7720 мм             |
| ▶ количество подов   | 19 шт.              |
| ▶ высота одного пода | 1100, 1300, 1600 мм |
| ▶ количество горелок | 42 шт.              |



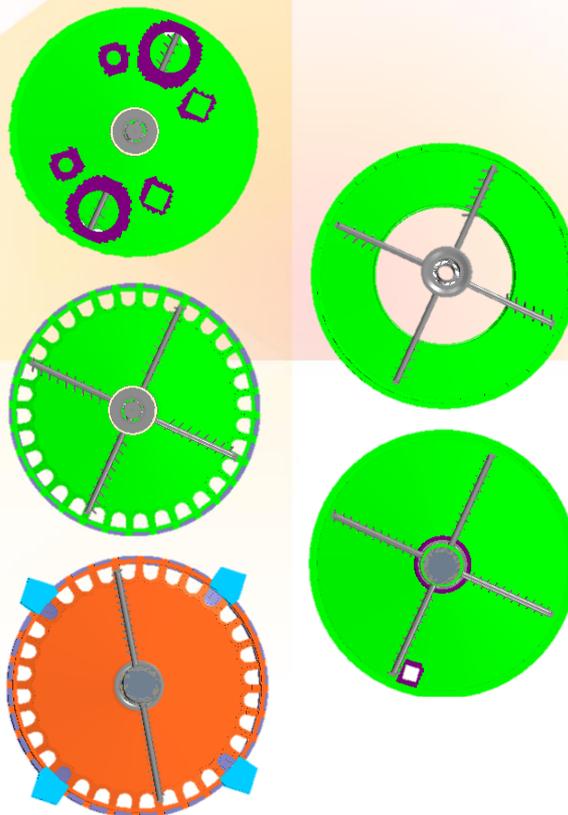
3D модель  
многоярусной печи



верхний и нижний  
песочный затвор печи



особенности расположение входов и выходов для  
газа и материала в различных подах печи



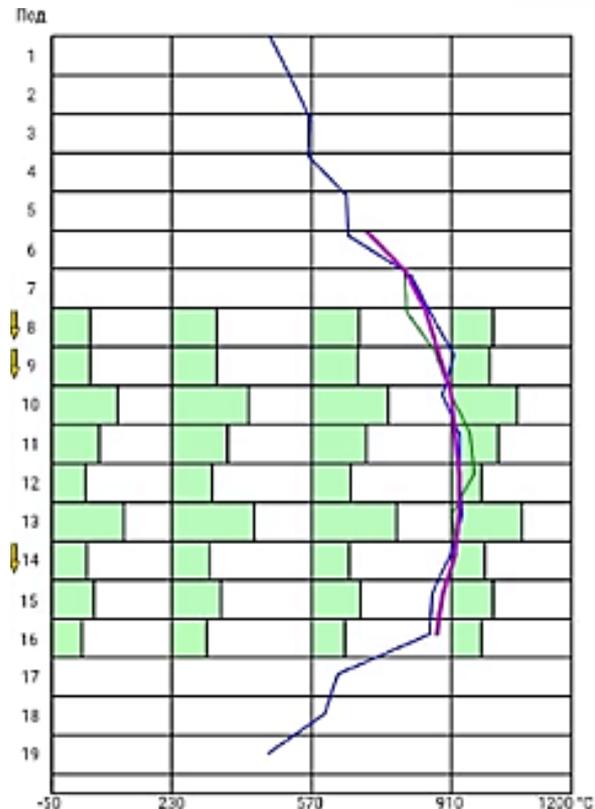
## принцип работы

### зоны многоярусной печи

- ▶ зона предварительного нагрева материала (1-2 под)
- ▶ зона обжига материала (3 – 13 под) с 4 горелками с направленным пламенем по касательной
- ▶ зона охлаждения материала (13-19 под)
- ▶ зона охлаждения вращающего центрального вала с рукоятями и лопатками



задание характера обжига магнезита в печи оператором



Исследование движения и свойств магнезита в многоподовой печи

## ВХОДНЫЕ И ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОБЖИГА

### входные параметры

- ▶ расход материала на вход в печи (т/час)
- ▶ фракционный состав материала на вход в печь (0-25 мм)
- ▶ скорость вращения центрального вала (об/мин)
- ▶ кривая нагрева материала по подам для АСУТП
- ▶ температура газа охлаждения центрального вала и воздуха горения (град. С)

### выходные параметры

- ▶ степень обжига магнезита



## явления, происходящие в печи

Практически все феномены, происходящие в печи, уже были рассмотрены в более ранних научных работах.

### основные феномены

- ▶ пересыпной характер движения материала сверху 1 пода до низа 19 пода и продвижением его от/к центральному валу;
- ▶ вращение разного количества рукоятей с разновысотными лопатками, охлаждаемые внутри воздухом из центрального вала, с образованием борозд материала на поду и возникновением механических напряжений лопаток;
- ▶ слой материала представляет собой пористый слой движущийся с определенной скоростью;

- ▶ горение природного газа в горелочных блоках (6 -16 подов) с тангенциальным выпуском продуктов реакции и вывод их через горелочные туннели;
- ▶ химическая реакция декарбонизации магнезита ( $MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$ );
- ▶ нагрев/охлаждение магнезита через слои футеровки, поды печи, малоподвижные слои материала стационарно находящиеся на поду, а также через газодинамику продуктов горения.

### исследовательские работы

1. Борзов, А.Н. Моделирование обжига магнезита в шахтной печи. Сатка, 2018. Конференция;
2. Борзов, А.Н. Моделирование обжига магнезита во вращающей печи. Москва, МИСиС, 2019. КОИМ;
3. Борзов, А.Н. Моделирование обжига магнезита в кольцевой печи. Сатка, 2019. Конференция;
4. Борзов, А.Н. Моделирование обжига магнезита в многоподовой печи. Москва, МИСиС, 2023. КОИМ;



# явления, происходящие в печи

В данной работе рассматривается пересыпной характер движения материала с образованием борозд.

## феномены, рассматриваемые в данной работе

- ▶ пересыпной характер движения материала сверху 1 пода до низа 19 пода и продвижением его от/к центральному валу;
- ▶ вращение разного количества рукоятей с разновысотными лопатками, охлаждение внутри воздухом из центрального вала, с образованием борозд материала на поду и возникновением механических напряжений лопаток.

видео образования борозд материала на поде печи от вращения рукоятей

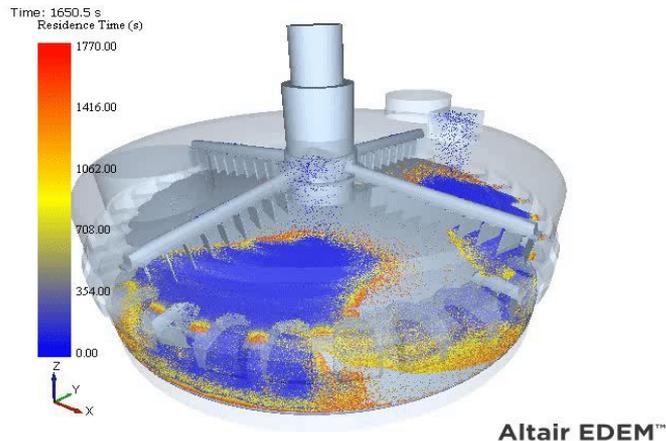




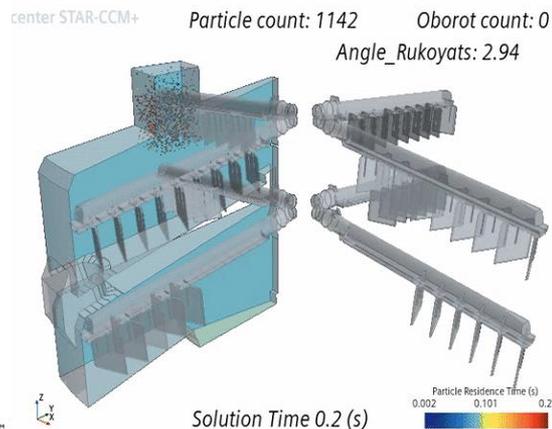
# варианты описания движения материала в многоподовой печи

предлагаемые варианты  
решения задачи.  
варианты 1, 2 и 3

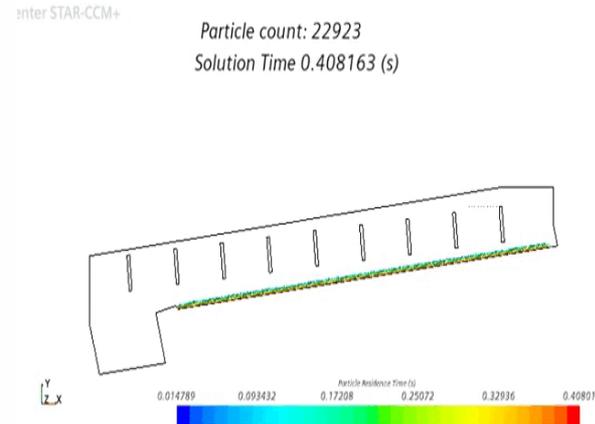
вариант 1 - 3D полный



вариант 2 - 1/32 пода



вариант 3 - 2D





# 2

## математическое моделирование движения материала по варианту 1



## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

- ▶ отобрать пробы с 1 по 19 подов многоподовой печи;
- ▶ провести мини тестовые испытания движущего материала;
- ▶ найти структуру (набор уравнений) математической модели описывающий движение материала;
- ▶ определить вариационные параметры в структуре исходя их реальных мини экспериментов;
- ▶ показать аналогичность протекания в мини тестах и мат модели;
- ▶ применить полученную мат модель к реальной геометрии многоподовой печи.

## настройка математической модели

Фракция  
+20 мм



Фракция-  
20+2.5 мм



Фракция  
-2.5+0 мм





# МИНИ ТЕСТОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДВИЖУЩЕГО МАТЕРИАЛА

- ▶ лабораторная установка с установленным наклономером;
- ▶ лабораторная установка анализ отскока материала в контактных парах (магнезит-магнезит, магнезит-лопатка, магнезит-футеровка);
- ▶ лабораторная установка для определения угла обрушения;
- ▶ лабораторная установка для определения угла естественного откоса.

## настройка математической модели



**МЦД**  
моделирование и  
цифровые двойники





# структура мат модели и вариационные параметры

настройка математической модели

## структура

вариационные параметры

### ► Уравнение Herz-Midlich

**Velocities:**

$$\vec{v}_{rel} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1 + \vec{\omega}_1 \times \vec{r}_c - \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_{c2}$$

$$\vec{v}_{rel,n} = \vec{r}_n \cdot (\vec{r}_n \cdot \vec{v}_{rel})$$

$$\vec{v}_{rel,t} = \vec{v}_{rel} - \vec{v}_{rel,n}$$

**Additional parameters:**

$$\alpha = \frac{\ln(e)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(e)}}$$

$$R^* = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}$$

$$M^* = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2}$$

$$E^* = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$$

**Normal force:**

$$\xi_n = r_1 + r_2 - |O_2 - O_1|$$

$$k_n = 2E^* \sqrt{\xi_n \cdot R^*}$$

$$\vec{r}_n = -\vec{r}_n \cdot \frac{2}{3} \xi_n \cdot k_n - \vec{r}_n \cdot \text{sgn}(\vec{v}_{rel,n} \cdot \vec{r}_n) \cdot 1.8257 \cdot \alpha \cdot |\vec{v}_{rel,n}| \cdot \sqrt{k_n \cdot M^*}$$

**Rolling friction:**

$$\vec{M}_{ro,1} = -\mu_{ro} \cdot |\vec{r}_n| \cdot r_1 \cdot \frac{\vec{\omega}_1}{|\vec{\omega}_1|}$$

$$\vec{M}_{ro,2} = -\mu_{ro} \cdot |\vec{r}_n| \cdot r_2 \cdot \frac{\vec{\omega}_2}{|\vec{\omega}_2|}$$

**Summarized forces and moments acting on particle (wall):**

$$\vec{F}_{tot} = \vec{F}_n + \vec{F}_t$$

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_n + \vec{F}_t$$

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_n - \vec{F}_t$$

$$\vec{M}_{tot,1} = \vec{r}_n \times \vec{F}_t \cdot r_1 + \vec{M}_{ro,1}$$

$$\vec{M}_{tot,2} = -\vec{r}_n \times \vec{F}_t \cdot r_2 + \vec{M}_{ro,2}$$

- статическое трение
- динамическое трение
- коэффициент отскока
- коэффициент сопротивления качения

Hertz H. (1882). Über die Berührung fester elastischer Körper. Journal die reine und angewandte Mathematik, 92, 156-171.



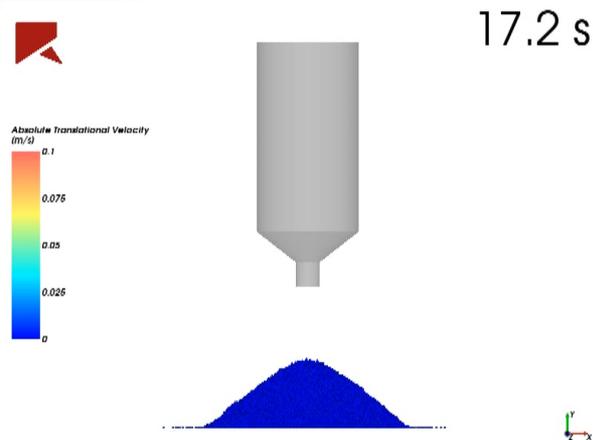
# аналогичность протекания процесса в мини экспериментах и мат. модели

настройка угла естественного  
откоса по всем подам с 1 по 19

Эксперимент



Математическое моделирование



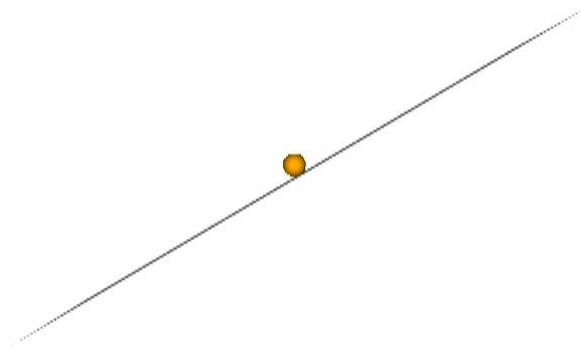


# аналогичность протекания процесса в мини экспериментах и мат. модели

настройка коэффициента трения  
по всем подам с 1 по 19

Эксперимент

Математическое моделирование



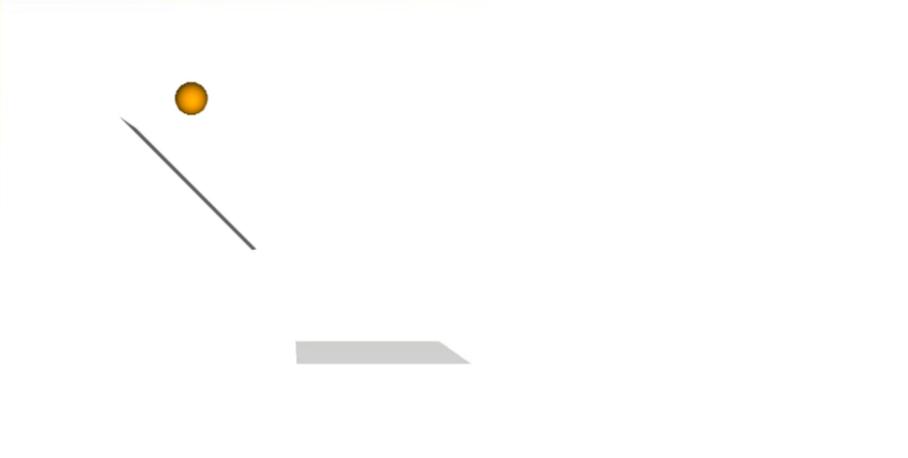


# аналогичность протекания процесса в мини экспериментах и мат. модели

настройка коэффициента  
восстановления

Эксперимент

Математическое моделирование



Исследование движения и свойств магнетита в многоподовой печи



# 3

## результаты расчетов

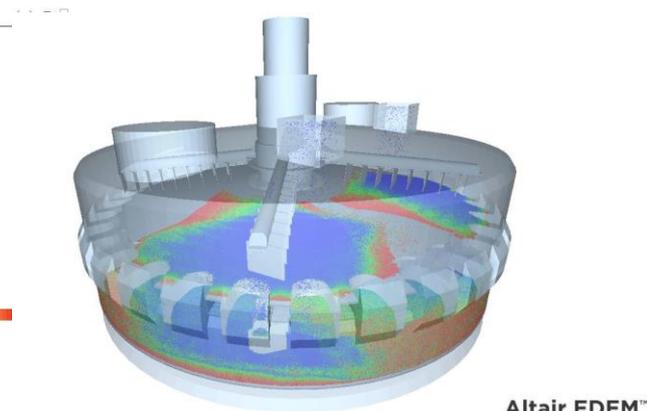
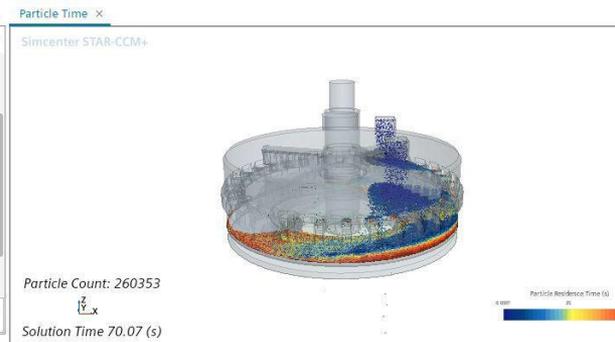
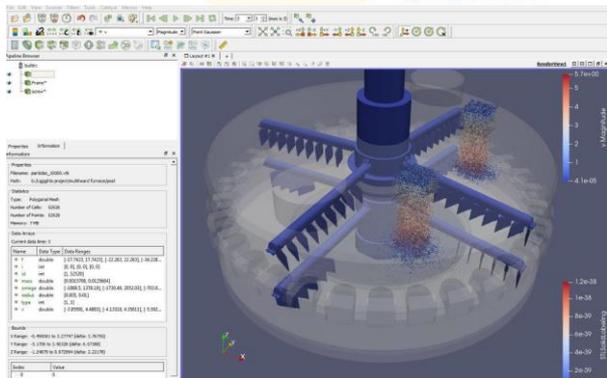


# реализация полученной структуры мат. модели в разных программах

Liggghts  
(Открытый исходный код, ОС – Linux  
Расчет на ЦПУ с 256 ядами )

Siemens Star CCM+  
(Коммерческий код, ОС - Windows),  
Расчет на ЦПУ с 256 ядами

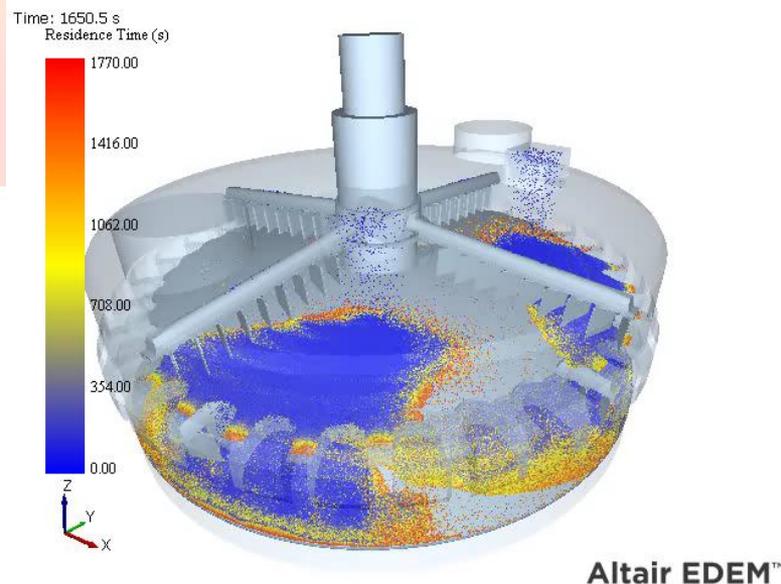
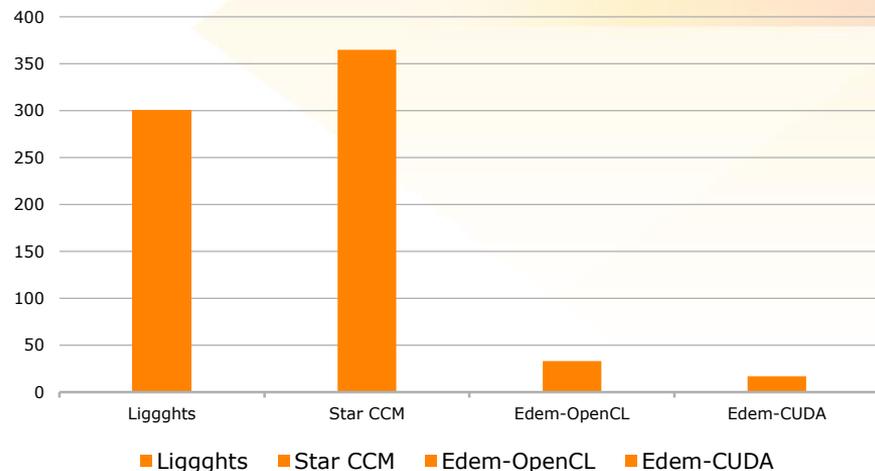
Altair EDEM  
(Коммерческий код, ОС - Windows),  
Расчет многовидеокартный – OpenCL  
Расчет многовидеокартный – Cuda





# скорость расчета мат. модели в разных программах

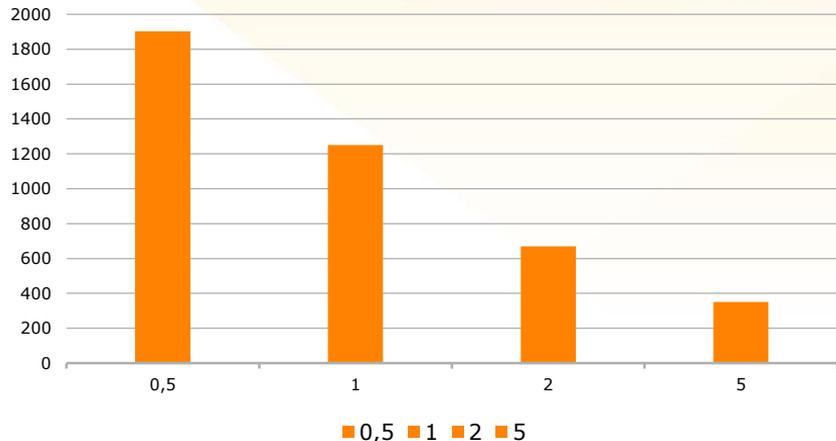
Время расчета 1800 сек (30 мин)



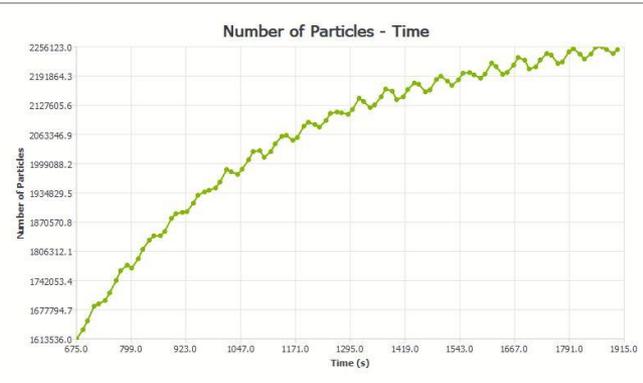
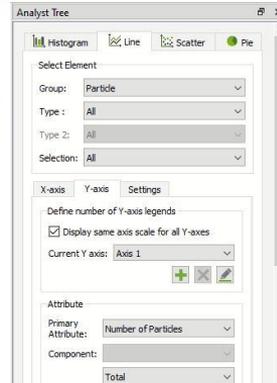
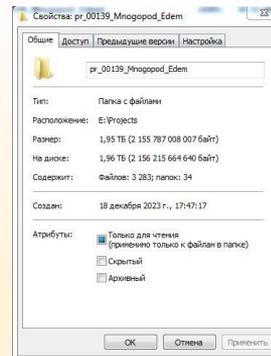


# объем данных результатов расчета

Время расчета 1800 сек  
(Частота записи)



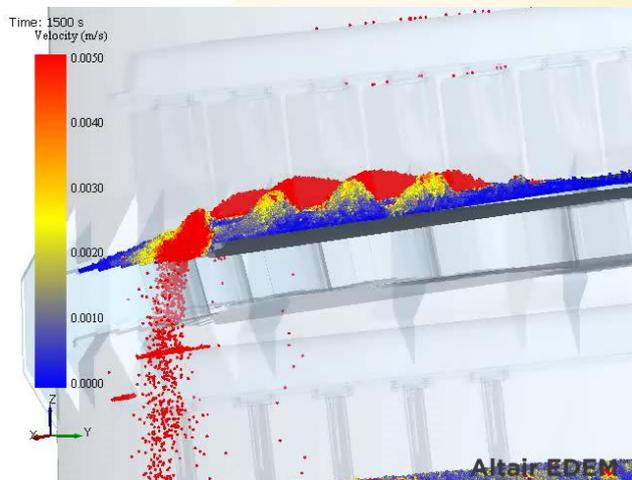
Altair Edem  
реализация



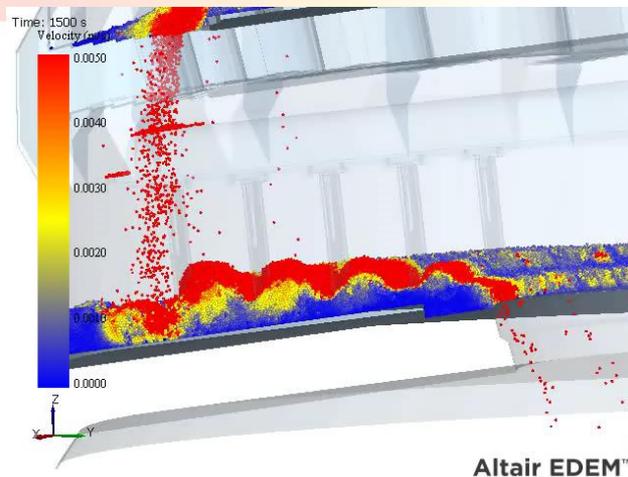


# анализ движения материала на поду печи

Altair EDEM  
реализация



Скорость движения  
материала на 1 поде

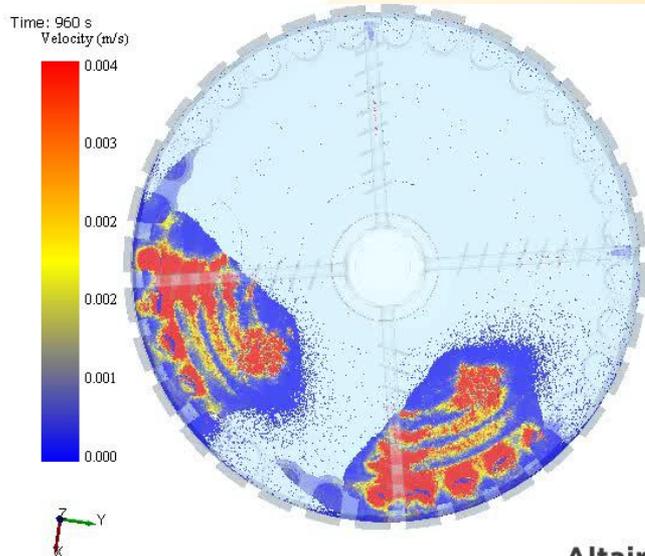


Скорость движения  
материала на 2 поде

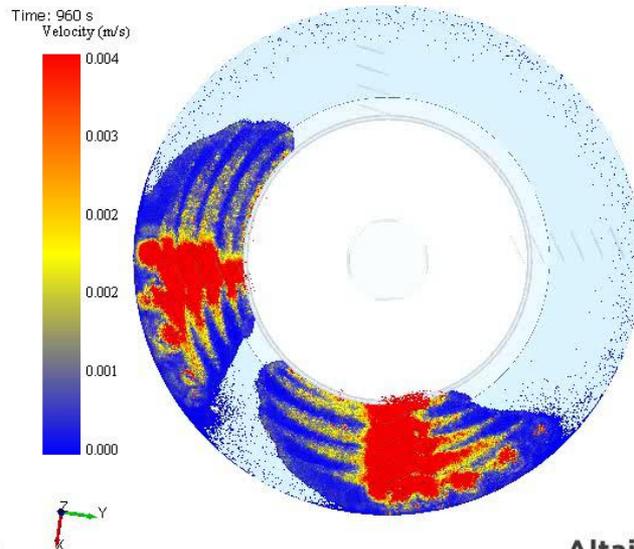


# анализ движения материала на поду печи

Altair EDEM  
реализация



Altair EDEM™



Altair EDEM™

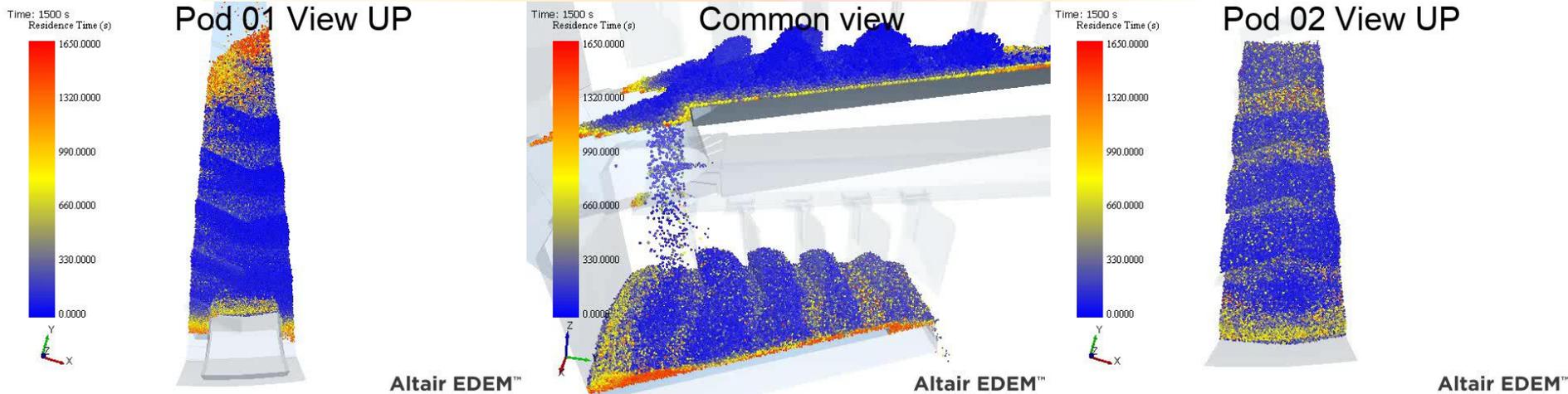
Скорость движения  
материала на 1 и 2 поде  
(вид сверху)



# анализ движения материала на поду печи

Altair Edem  
реализация

Динамическая высота слоя материала в секторе печи





# анализ распределения материала на поду печи

Altair EDEM  
реализация

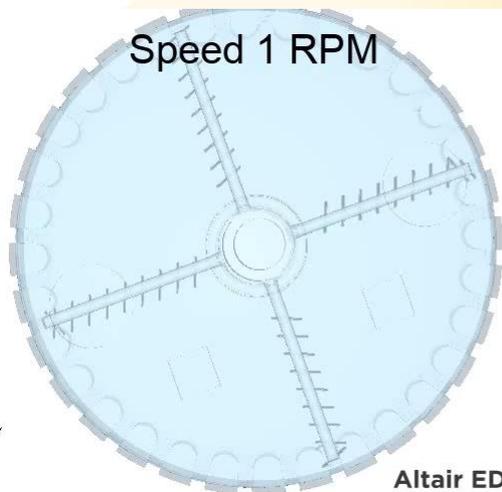
Time: 0 s

Speed 1 RPM

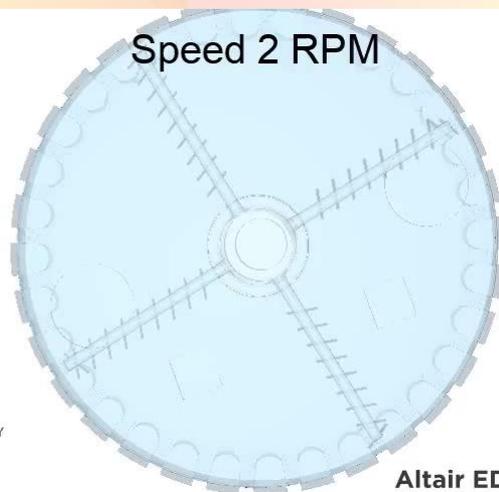
Time: 0 s

Speed 2 RPM

Форма засыпки пода  
в зависимости от скорости  
вращения центрального вала



Altair EDEM™



Altair EDEM™



# 4

## ВЫВОДЫ

# анализ модельных решений

вид снизу на нижний под вращающейся печи Бета Рекорд 100-2



Исследование движения и свойств магнетита в многоподовой печи

Вычислительная сложность просчета 1800 сек с заданной скоростью вращения рукоятей – 2 недели. Оптимальный выбор для расчета мат. модели – сервер с 2-мя и более видеокартами Nvidia V100 с объемом HDD не менее 1Тб.

предложенная мат. модель (вариант 1) позволяет:

- ▶ без аналитического вычисления строить динамическую расчетную область для разных количеств рукоятей и лопаток, учитывая при этом разновариантный поворот лопаток относительно рукоятей;
- ▶ получать профили движения материала по длине пода как для подвижных, так и малоподвижных слоев;
- ▶ учитывать сползание/подъем материала для сплошных и колодезных подов (нечетный/четный под);
- ▶ оценить скоростные и временные параметры для слоя материала, а также его пористость
- ▶ обладает высокой точностью из-за с валидации ее на реальных мини тестах физ. экспериментов .



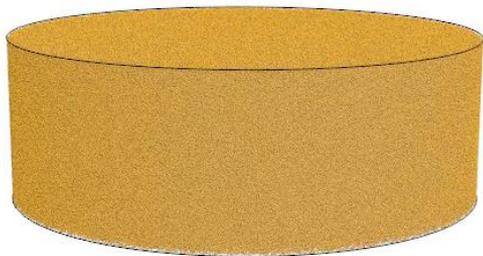


Вариант DEM-CFD

Simcenter STAR-CCM+

Particles: 5.02861e+08

Parcels: 4.02289e+06



Particle Velocity: Magnitude (m/s)

< -10      -3.75      > 2.5



Velocity: Magnitude (m/s)

2      3.5      > 5

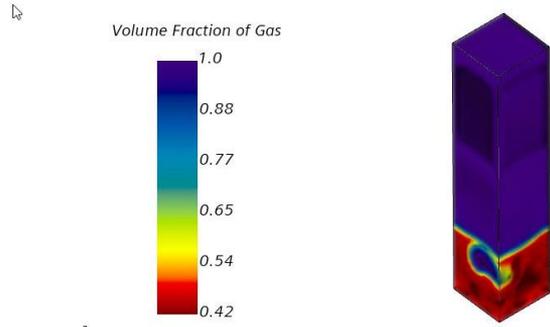


Solution Time 0.01 (s)

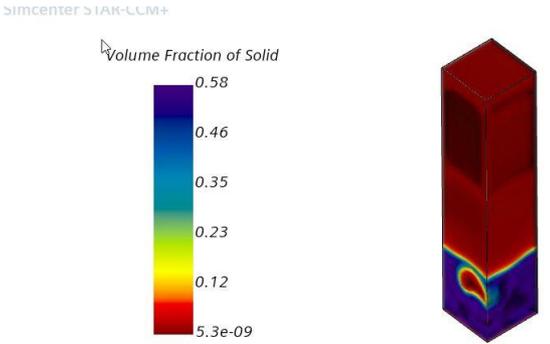
## рекомендации по построению вычислений для всей многоподовой печи

- ▶ рассмотреть вариант движения материала с учетом CFD – DEM-CFD подход ;

## Вариант Ейлер



Solution Time 20 (s)



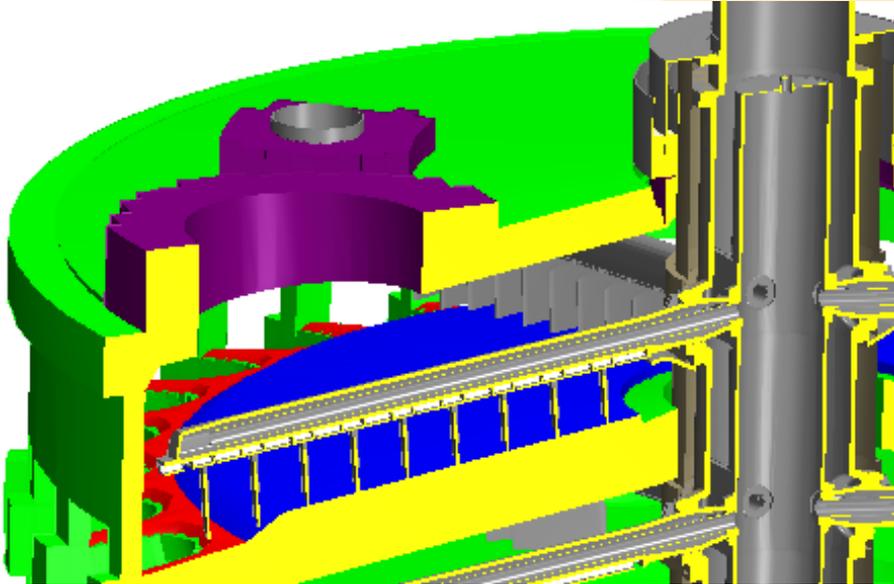
Solution Time 20 (s)

# рекомендации по построению вычислений для всей многоподовой печи

- ▶ рассмотреть вариант движения материала в Ейлеровской постановке;



Вариант движущее пористое тело



# рекомендации по построению вычислений для всей многослойной печи

- ▶ рассмотреть вариант движения материала как движущее пористое тело постановке;
- ▶ построить и проанализировать работу всей печи при разных параметрах нагрева и производительности (1 вариант);



# благодарности

выражаю благодарность сотрудникам Группы Магnezит:

- ▶ Дацко Алексею Николаевичу,  
ведущему специалисту Департамента стратегического развития;
- ▶ Туйгунову Руслану Юлдыбаевичу,  
руководителю инженерно-конструкторской группы управления ремонтов;
- ▶ Байсарову Александру Федоровичу,  
специалисту по проектированию управления Инжиниринга Проектов и  
Производства работ, проектно-конструкторский отдел.

# спасибо

Борзов Андрей Николаевич

197342 г.Санкт-Петербург, ул.  
Белоостровская, д.17, к.2а, офис 504

телефон: +7 (812) 326-07-90

e-mail: [aborzov@magnezit.com](mailto:aborzov@magnezit.com)



[сайт Группы Магнезит](#)