

моделирование процесса обжига магнезита в многоподовой печи

Борзов Андрей Николаевич

к.т.н., инженер – технолог

XX Конференция огнеупорщиков и металлургов
МИСиС, Москва
май 2023



1

анализ решения задачи моделирования многоподовой печи

- ▶ общие сведения
- ▶ принцип работы
- ▶ входные и выходные параметры обжига
- ▶ явления, происходящие в печи
- ▶ математические модели многоподовой печи
- ▶ варианты математического моделирования процесса обжига

2

математическое моделирование по варианту 3

- ▶ постановка задачи
- ▶ динамически изменяющаяся расчетная сетка

3

результаты расчетов

- ▶ количество частиц
- ▶ скорость и время нахождения частиц на поде без воздействия лопаток
- ▶ скорость и время нахождения частиц на поде под воздействием лопаток
- ▶ скорость и время нахождения частиц на поде послойно
- ▶ алгоритмическая сложность вычислений

4

выводы

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



1

анализ решения задачи моделирования многоярусной печи



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



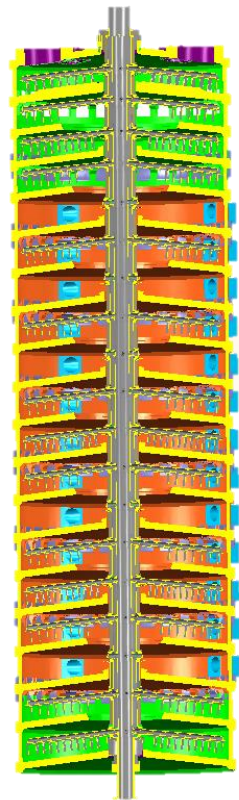
общие сведения

параметры печи

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



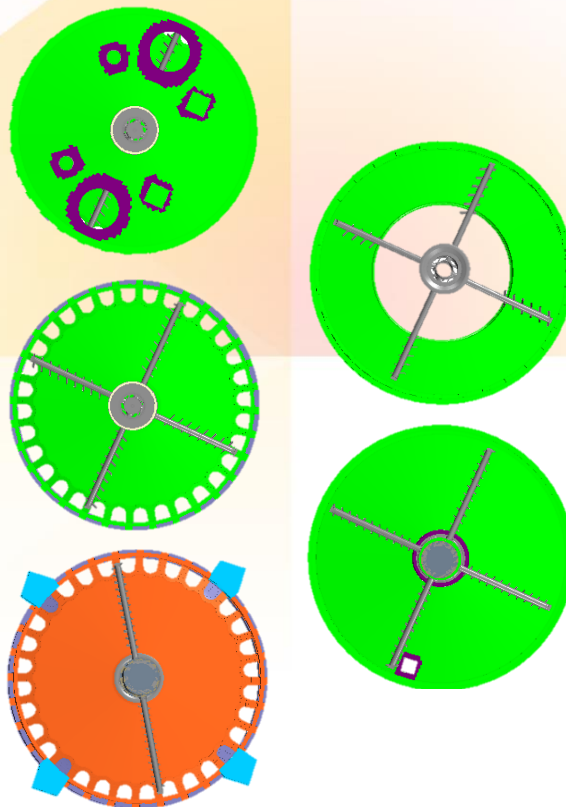
3D модель
многоподовой печи



верхний и нижний
песочный затвор печи



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



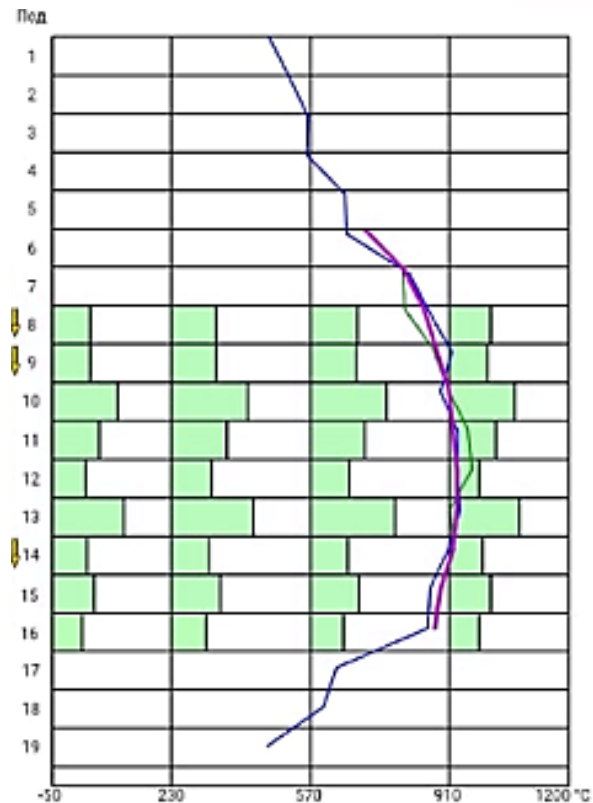
принцип работы

зоны многоподовой 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 магнетита в печи оператором



моделирование процесса обжига магнетита 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 магнетита



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 туннельной печи. Москва, МИСиС, 2022. 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, охлаждаемые 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



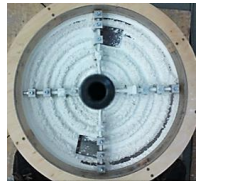
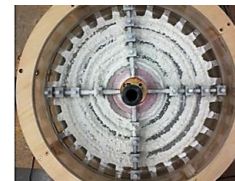
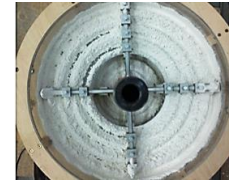
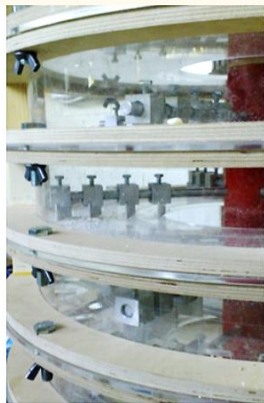
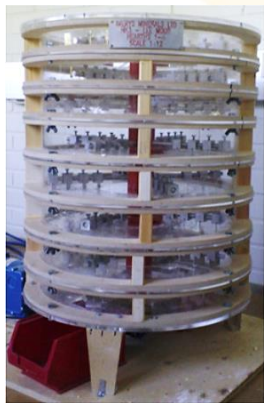


математические модели многоподовой печи

лабораторные испытания модели многоподовой печи. Эксперимент по обжигу каолинита ($\text{Al}_2\text{H}_4\text{O}_9\text{Si}_2$)

лабораторная установка многоподовой печи в пропорции 1/12 от реальной печи

фотографии подов после пробных экспериментов по обжигу в модели многоподовой печи (поды 1-8)



Alexi Eskilin. Dynamic modelling of a multiple hearth furnace. Aalto University, 2014.

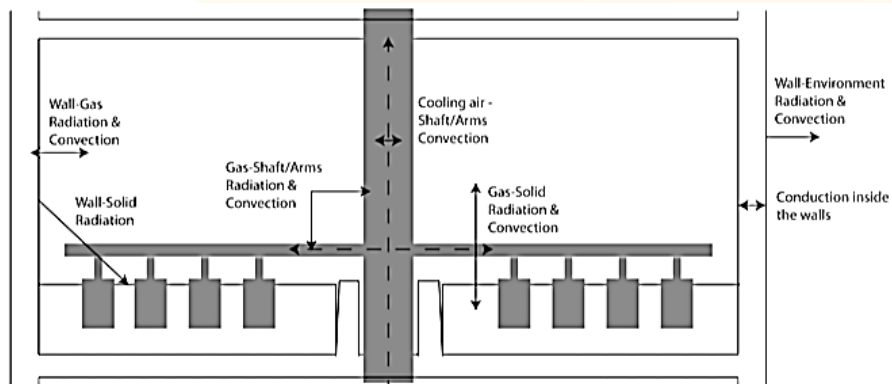
моделирование процесса обжига магнезита в многоподовой печи



математические модели многоподовой печи

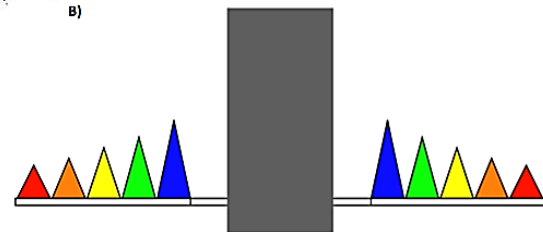
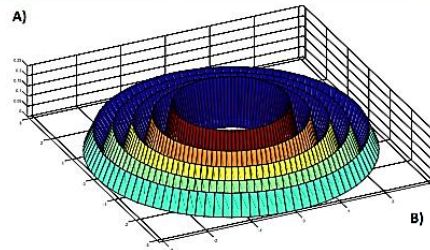
лабораторные испытания модели многоподовой печи. Эксперимент по обжигу каолинита ($\text{Al}_2\text{H}_4\text{O}_9\text{Si}_2$)

пути распространения тепла согласно MFH модели



А) вид на сплошной стенд с 5 кольцевыми отсеками

В) вид на сплошной стенд в разрезе

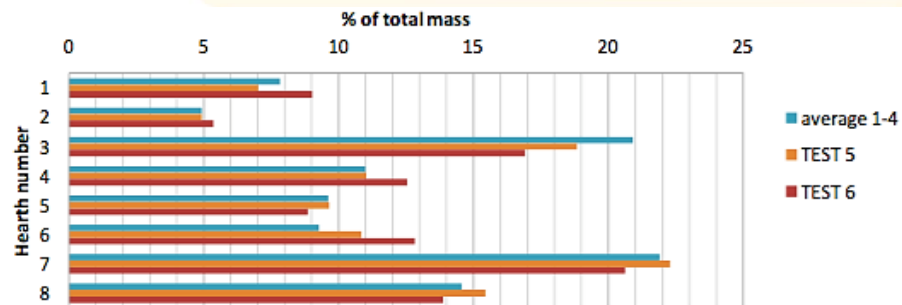




математические модели многоподовой печи

лабораторные испытания модели многоподовой печи. Эксперимент по обжигу каолинита ($\text{Al}_2\text{H}_4\text{O}_9\text{Si}_2$)

график распространения общей массы в печи для тестов 5 и 6 в сравнении со средним результатом тестов 1-4



A) основное окно программы-симулятора GUI

B) окно визуализации результатов симуляции программы GUI

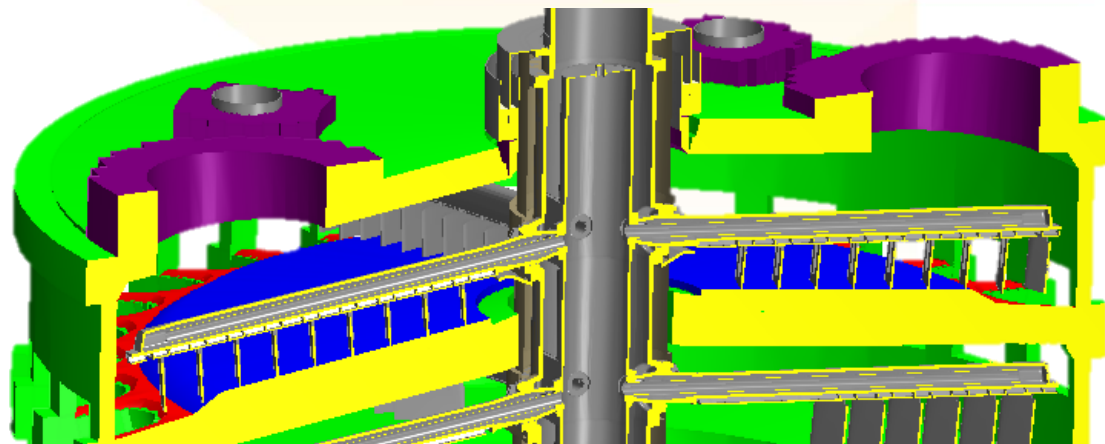




варианты математического моделирования процесса обжига

предлагаемые варианты
решения задачи.
варианты 1 и 2

вариант 1 - 3D полный



моделирование процесса обжига магнетита в многоподовой печи

вариант 2 - 1/32 пода

Simcenter STAR-CCM+

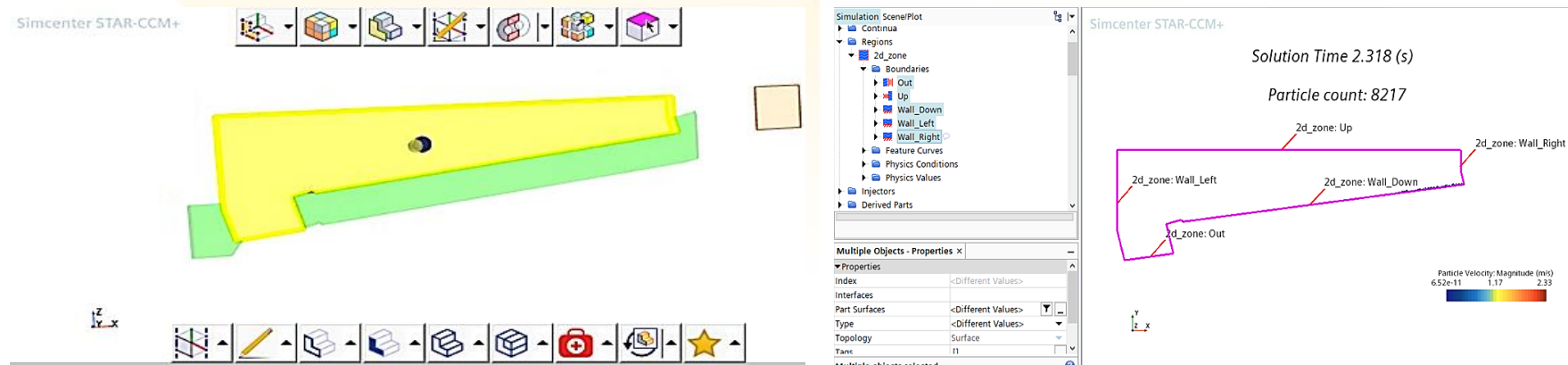
Output x		
make_fluid_zone_pod01 x	make_fluid_zone_pod01 x	
Fluid_Zone Pod01_Mat_Dynamics:	0.077817 m ³	[-2.0161, -0.20301, 23.515] m,m,m
Fluid_Zone Pod01_Mat_Static:	0.043308 m ³	[-2.1006, -0.21170, 23.430] m,m,m
Fluid_Zone Pod01_Mat_Static_Ending:	0.0053528 m ³	[-3.1145, -0.35188, 23.301] m
Total:	0.12648 m ³	[-2.0915, -0.21229, 23.477] m,m,m



анализ движения материала на поде по предлагаемой математической модели

предлагаемые варианты решения задачи.
вариант 3 - 2D модель движения материала по поду под воздействием рукоятей с лопатками

вариант 3 - 2D модель движения материала по поду под воздействием рукоятей с лопатками

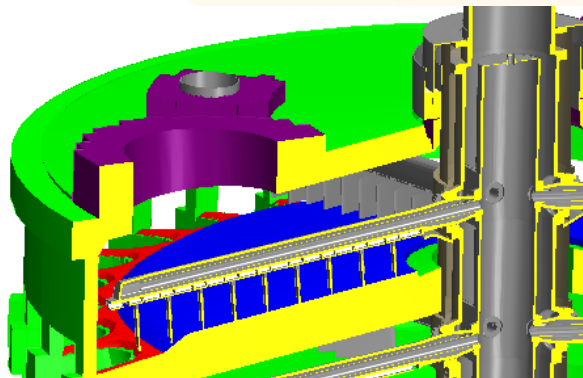




анализ движения материала на поде по предлагаемой математической модели

входные и выходные параметры для моделирования

3D визуализация положения материала на поде



входные параметры

- ▶ расход материала в печи;
- ▶ место подачи;
- ▶ фракционный состав материала;
- ▶ скорость вращения центрального вала.

выходные параметры

- ▶ распределение высоты материала по поду с последующим 3D построением области;
- ▶ послойная скорость движения материала по поду;
- ▶ время нахождения материала на поде.

доп. входные параметры

- ▶ алгоритмическая сложность вычисления



2

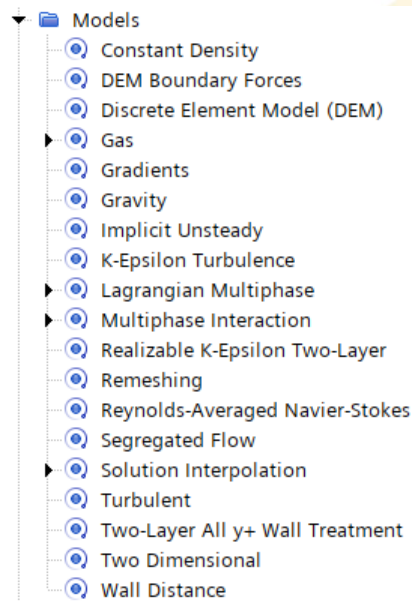
математическое моделирование по варианту 3



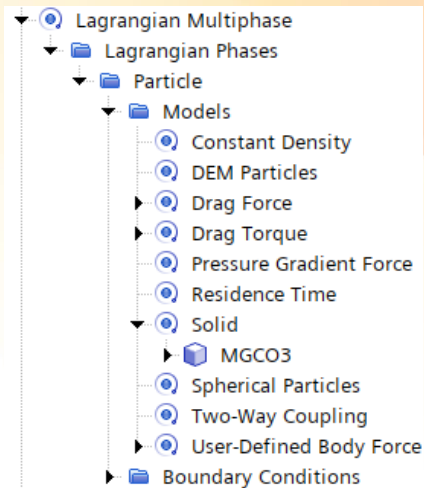
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

настройка математической модели

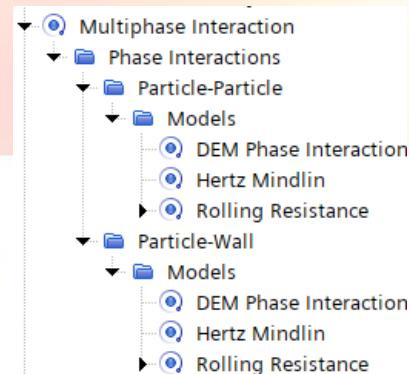
общий вид



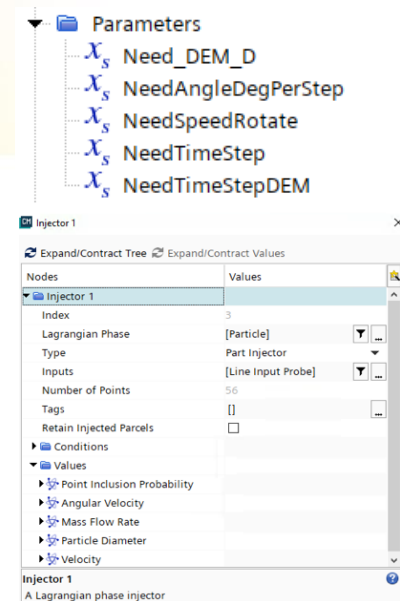
настройка Лагранжевой фазы



настройка взаимодействия внутри Лагранжевой фазы



изменяемые параметры мат модели

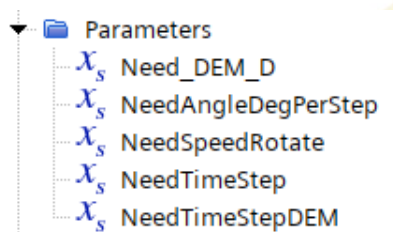




ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

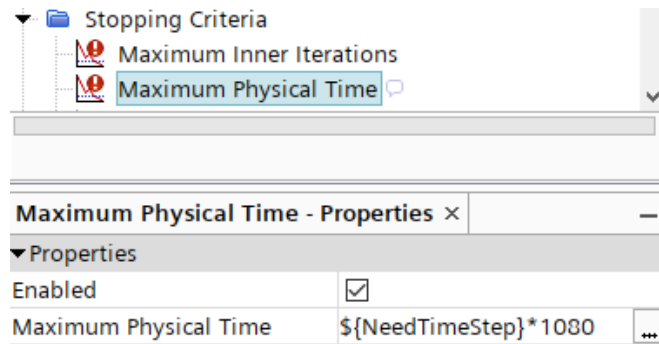
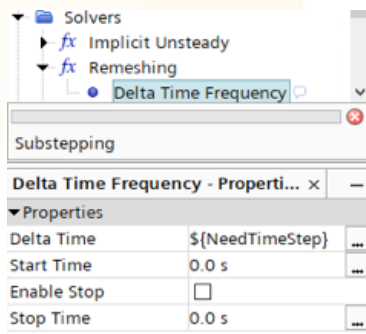
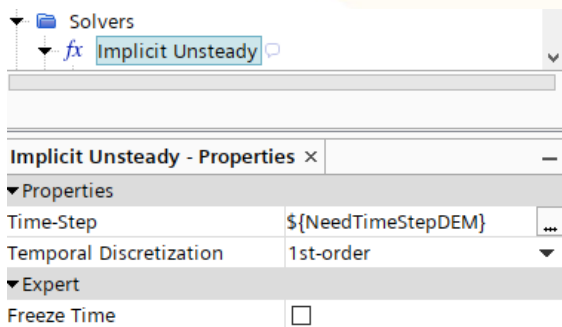
варьируемые параметры
математической модели
и использование их в решателе

изменяемые параметры математической модели



$\text{\${NeedAngleDegPerStep}} * 1.0 / (\text{\${NeedSpeedRotate}} / 0.1047197551196598 * 6)$

$\text{\${NeedTimeStep}} / \text{ceil}(\text{\${NeedTimeStep}} / 0.001)$





динамически изменяющаяся расчетная сетка

задание свойств перестроителя расчетной сетки

задание качества расчетной сетки и алгоритма ее расчета

Remeshing - Properties

▼ Properties

Mesh Operations [Transform, Subtract, E] ...

Check Cell Volume

Min Cell Volume 0.0

▼ Expert

Check Cell Quality

Min Cell Quality 0.001

Check Least Squares Quality

Check Face Validity

Check User Defined Quality

User Defined Quality Skewness Anqle ...

3D-CAD Models

Parts

Descriptions

Contacts

Operations

- Transform
- Subtract
- Badge for 2D Meshing
- Automated Mesh
- Automated Mesh 2

Continua

Parts Meshes

Physics Dem 2d

Remeshing - Mesh Operations

Operations

- Transform
- Subtract
- Badge for 2D Meshing
- Automated Mesh
- Automated Mesh 2

Operations

- Transform
 - Transforms
 - Motion

Iterating: Running

Motion - Properties

▼ Properties

Motion [Rotation Lopatka] ...

Enable Transform

Index 1

Tags [] ...

Rotation Lopatka

Expand/Contract Tree Expand/Contract Values

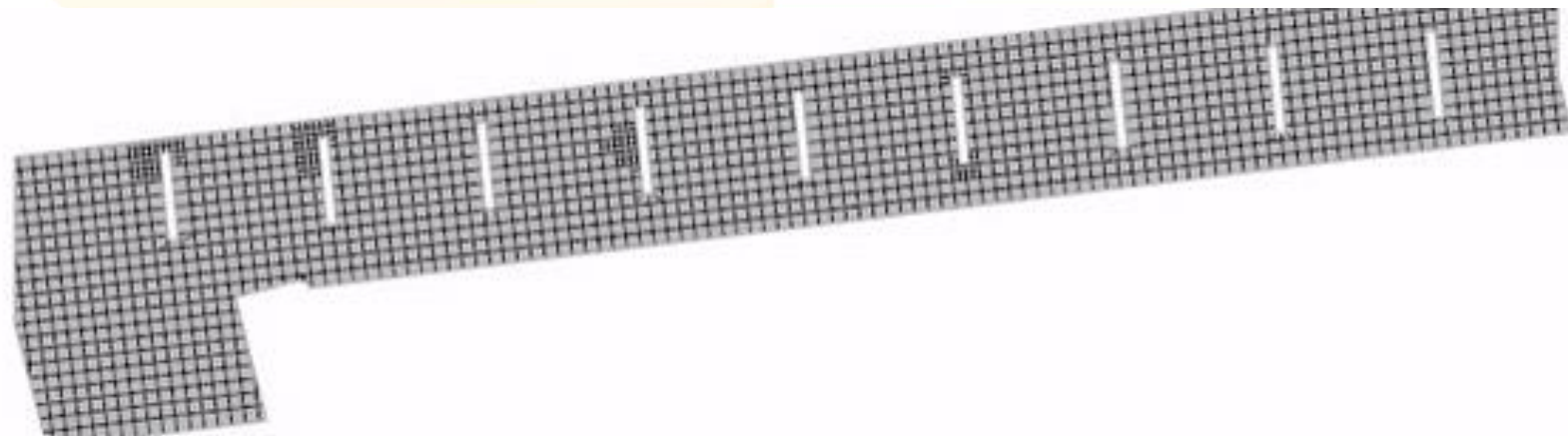
Nodes	Values
Rotation Lopatka	
Axis Direction	[0.0, 1.0, 0.0]
Axis Origin	[0.0, 0.0, 0.0] m
Rotation Specification	Rotation Rate
Coordinate System	Laboratory
Managed Coordinate Systems	
Tags	[]
Rotation Rate	
Rotation Rate	-\${NeedSpeedRotate}
Superposing Motions	



динамически изменяющаяся расчетная сетка

перестроение расчетной сетки
в результате вращения рукоятей
с лопатками

анимация изменения 2D расчетной сетки





3

результаты расчетов



КОЛИЧЕСТВО ЧАСТИЦ

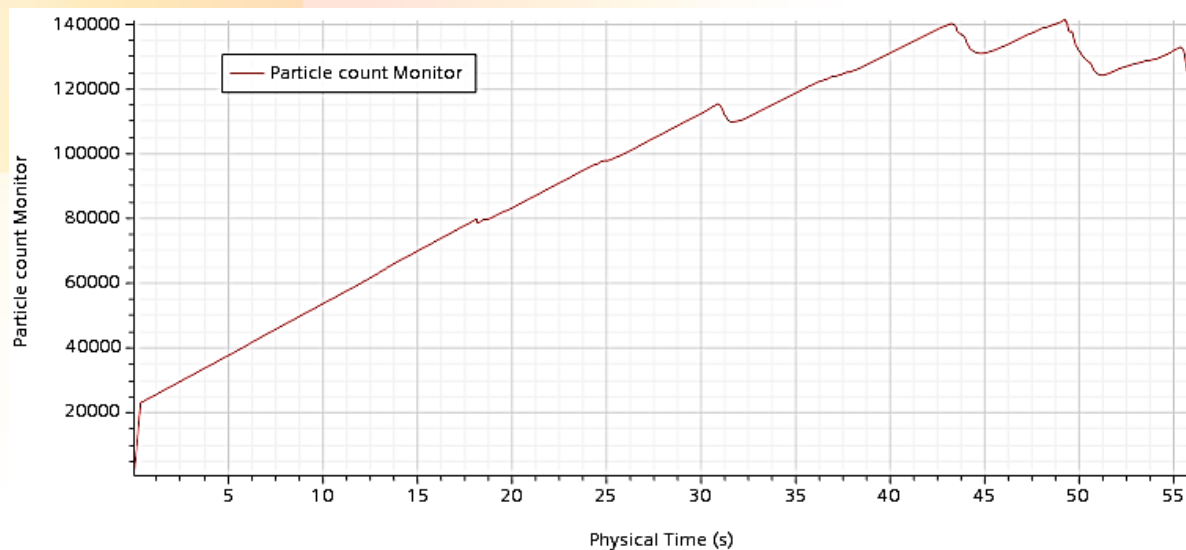
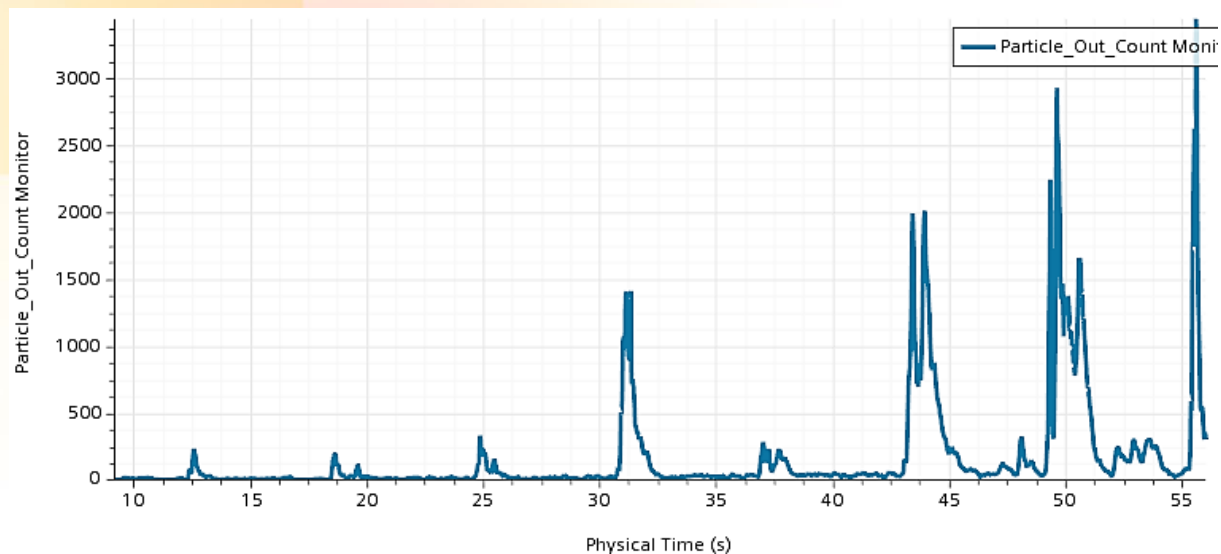


график изменения общего
количества частиц на поде



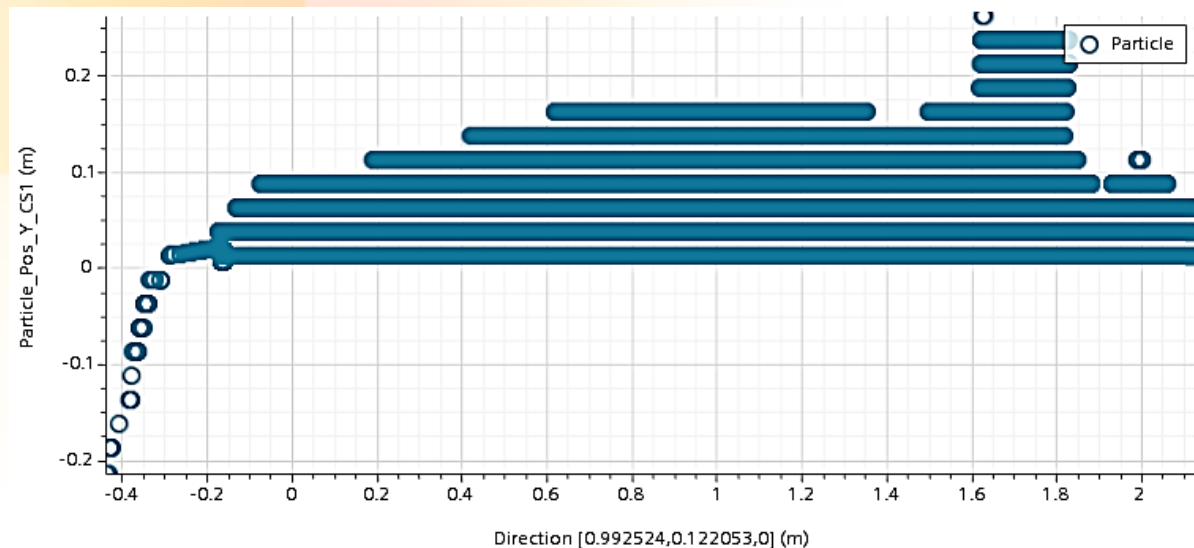
КОЛИЧЕСТВО ЧАСТИЦ

график изменения
количества частиц
на выходе из пода





КОЛИЧЕСТВО ЧАСТИЦ



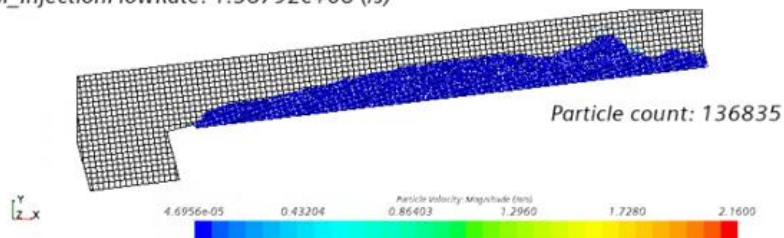
распределение высоты
слоя материала на поде



скорость и время нахождения материала на поде без воздействия лопаток

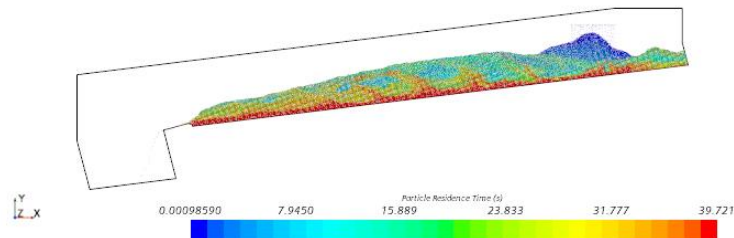
скорость движения частиц

Simcenter STAR-CCM+
 Set RPM: 2.45 Angle Rukoyats: 258 Oborot Count: 1
 Current Iteration: 617 Solution Time 42.0408 (s) SubStep: 69 SubStepMax: 69
 dt_DEM: 0.000985902 (s) dt_Mesh: 0.0680272 (s) dt_Angle in Deg: 1
 DEM_InjectionFlowRate: 1.38792e+08 (/s)



время нахождения частиц на поде

Simcenter STAR-CCM+
 Set RPM: 2.45 Angle Rukoyats: 258 Oborot Count: 1
 Particle count: 136809
 Solution Time 42.0319 (s)

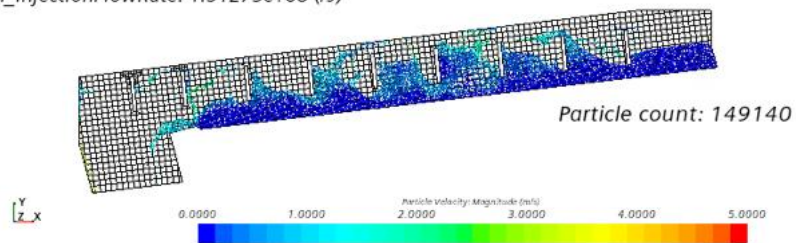




скорость и время нахождения материала на поде под воздействием лопаток

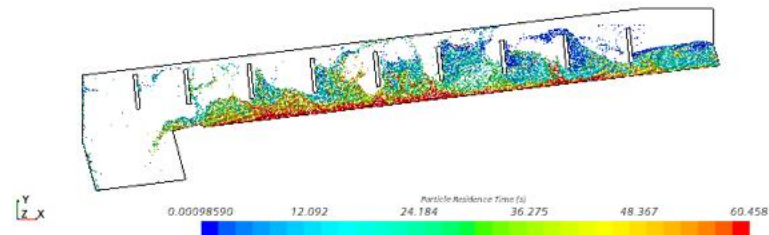
скорость движения частиц

Simcenter STAR-CCM+
 Set RPM: 2.45 Angle Rukoyats: 276 Oborot Count: 2
 Current Iteration: 995 Solution Time 67.7314 (s) SubStep: 45 SubStepMax: 69
 dt_DEM: 0.000985902 (s) dt_Mesh: 0.0680272 (s) dt_Angle in Deg: 1
 DEM_InjectionFlowRate: 1.51273e+08 (l/s)



время нахождения частиц на поде

Simcenter STAR-CCM+
 Set RPM: 2.45 Angle Rukoyats: 276 Oborot Count: 2
 Particle count: 149140
 Solution Time 67.7314 (s)





скорость и время нахождения материала на поде. вращение лопаток

скорость движения частиц

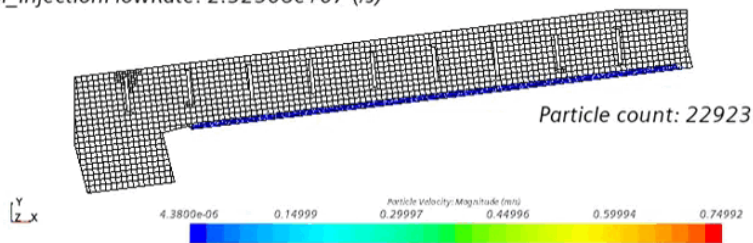
Simcenter STAR-CCM+

Set RPM: 2.45 Angle Rukoyats: 6 Oborot Count: 0

Current Iteration: 5 Solution Time 0.408163 (s) SubStep: 69 SubStepMax: 69

dt_DEM: 0.000985902 (s) dt_Mesh: 0.0680272 (s) dt_Angle in Deg: 1

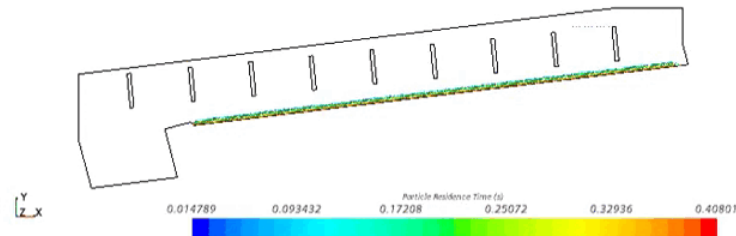
DEM_InjectionFlowRate: 2.32508e+07 (ls)



Simcenter STAR-CCM+

Particle count: 22923

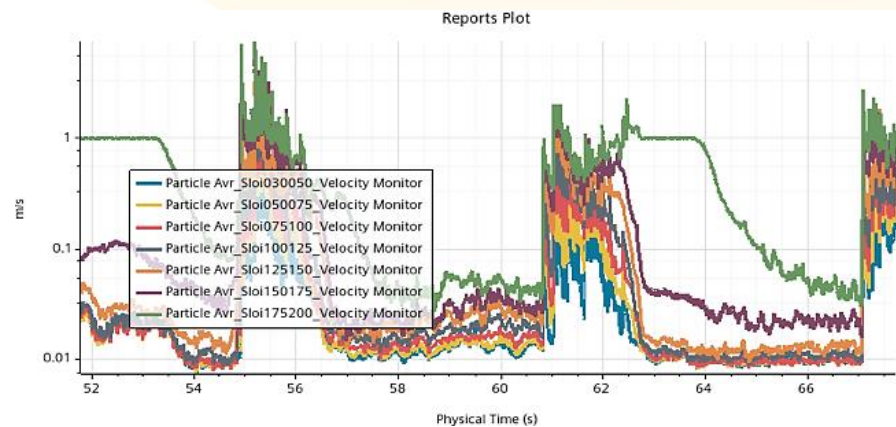
Solution Time 0.408163 (s)



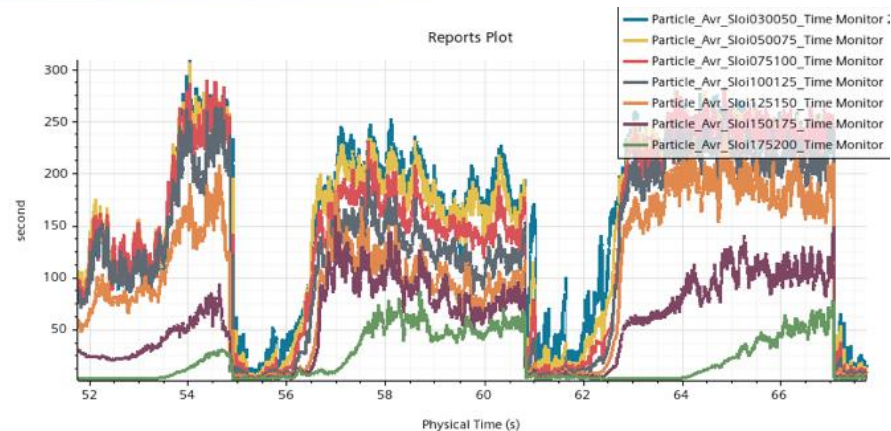


скорость и время нахождения материала на поде послыно

скорость движения частиц



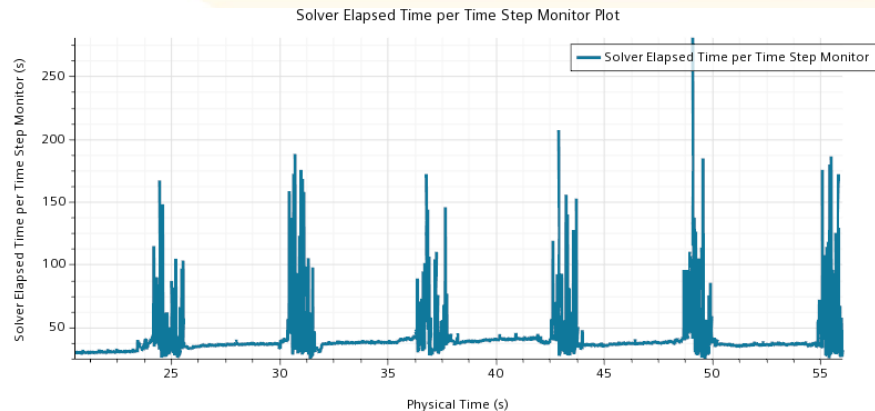
время нахождения частиц на поде



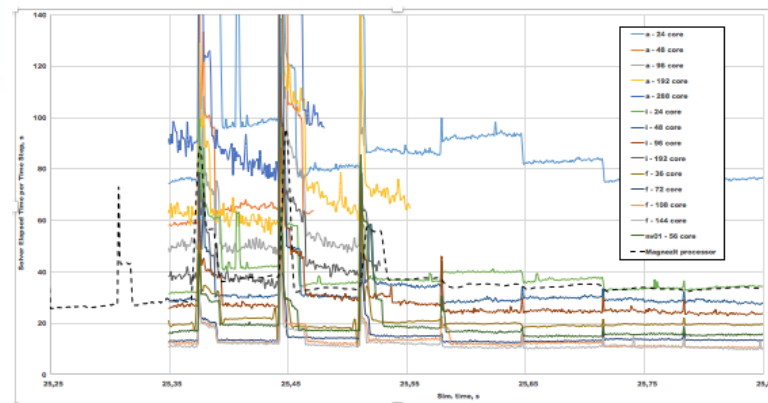


алгоритмическая сложность вычисления

анализ времени расчета одного шага*



анализ времени расчета одного шага на разных конфигурациях
вычислительного кластера*



*Тестирование проводилось на вычислительном кластере Крыловского НИИ г Санкт-Петербург.



4

ВЫВОДЫ

анализ модельных решений

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



моделирование процесса обжига магнезита в многоподовой печи

Вычислительная сложность просчета 1 оборота с заданной скоростью вращения рукоятей - 1 неделя. Оптимальный выбор для расчета мат. модели – 96-ядерная машина.



предложенная мат. модель (вариант 3) 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.

Вид на многоподовую печь Бета Рекорд 100-2. Комплекс плотнospеченных порошков Рекорд, Саткинская производственная площадка Группы Магнезит



моделирование процесса обжига магнезита в многоподовой печи

рекомендации по построению вычислений для всей многоподовой печи

- ▶ произвести варьирование разных скоростей вращения рукоятей и производительности печи;
- ▶ рассмотреть движения материала на всех подах с 1 по 19 в 2D постановке (3 вариант);
- ▶ рассмотреть движения материала на всех подах с 1 по 19 в постановке 1/32 сектора (2 вариант);
- ▶ рассмотреть движение материала в разных программах Star CCM+, EDEM, ESSS Rocky, в том числе с использованием открытых сред программирования (китайский язык параллельного программирования TaiChi);
- ▶ построить и проанализировать работу всей печи при разных параметрах нагрева и производительности (1 вариант);

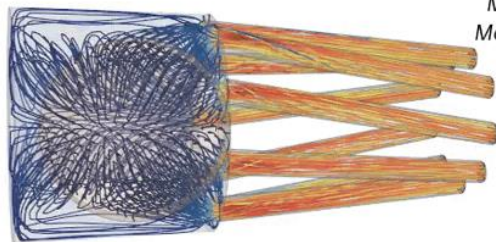


практические наработки

газодинамика горелки по воздуху горения и природному газу

векторное поле скорости потока воздуха горения в горелке

Simcenter STAR-CCM+

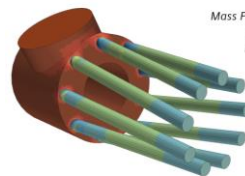


Pressure_Input: 8000 (Pa)

Mass Flow Balance: $-3.6816e-05$ (kg/s)
Mass Flow In: -0.882044 (kg/s)
Mass Flow Out: 0.882008 (kg/s)



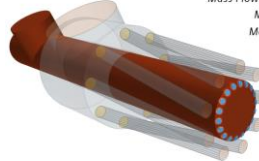
Simcenter STAR-CCM+



Pressure_Air_Input: 8000 (Pa)
Mass Flow Air Balance: $-2.35895e-06$ (kg/s)
Mass Flow Air In: -0.881563 (kg/s)
Mass Flow Air Out: 0.881561 (kg/s)

Pressure_CH4_Input: 14000 (Pa)
Mass Flow CH4 Balance: -4.6542
Mass Flow CH4 In: -0.258875
Mass Flow CH4 Out: 0.258874

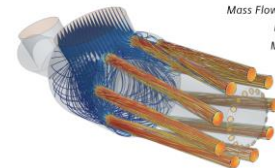
Simcenter STAR-CCM+



Pressure_CH4_Input: 14000 (Pa)
Mass Flow CH4 Balance: $-4.65422e-07$ (kg/s)
Mass Flow CH4 In: -0.258875 (kg/s)
Mass Flow CH4 Out: 0.258874 (kg/s)

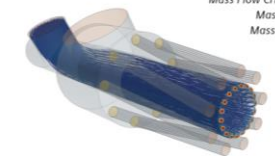
Pressure_Air_Input: 8000 (Pa)
Mass Flow Air Balance: $-2.35895e-6$
Mass Flow Air In: -0.881563 (kg/s)
Mass Flow Air Out: 0.881561 (kg/s)

Simcenter STAR-CCM+



Pressure_Air_Input: 8000 (Pa)
Mass Flow Air Balance: $-2.35895e-06$ (kg/s)
Mass Flow Air In: -0.881563 (kg/s)
Mass Flow Air Out: 0.881561 (kg/s)

Simcenter STAR-CCM+



Pressure_CH4_Input: 14000 (Pa)
Mass Flow CH4 Balance: $-4.65422e-07$ (kg/s)
Mass Flow CH4 In: -0.258875 (kg/s)
Mass Flow CH4 Out: 0.258874 (kg/s)

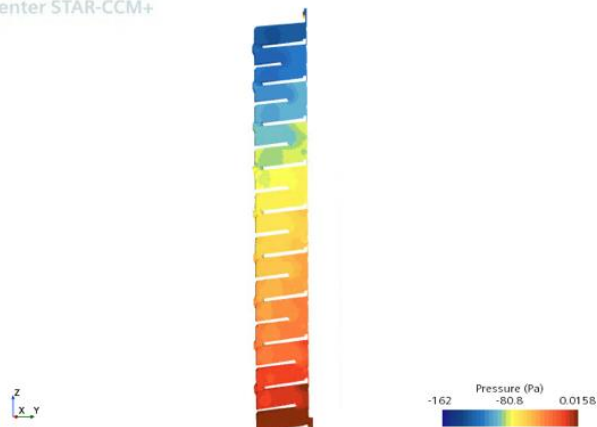


практические наработки

газодинамика газа на подах печи 1/32 (вариант 2)

визуализация давления в печи

Simcenter STAR-CCM+



визуализация скорости воздуха в печи

Simcenter STAR-CCM+

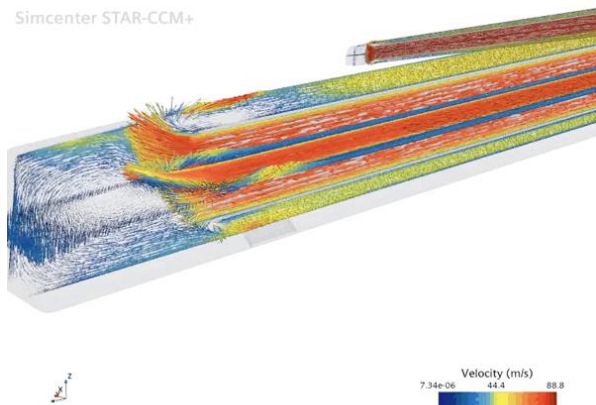


практические наработки

газодинамика газа на подах печи 1/32 (вариант 2)

векторное поле скоростей воздуха охлаждения внутри рукоятей

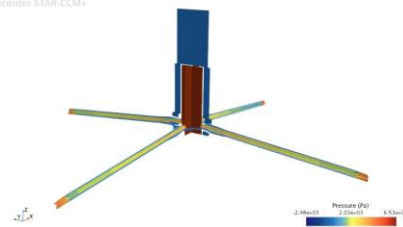
Simcenter STAR-CCM+



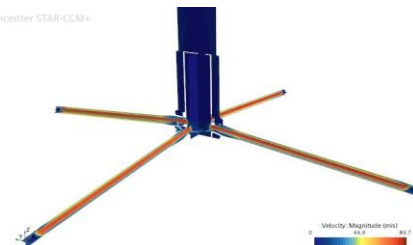
моделирование процесса обжига магнезита в многоподовой печи

скорость и давление воздуха в рукоятях пода печи

Simcenter STAR-CCM+



Simcenter STAR-CCM+



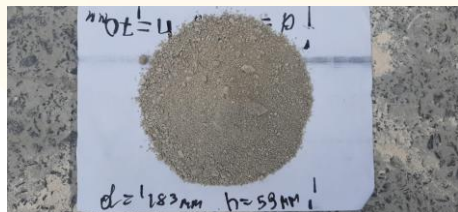


практические наработки

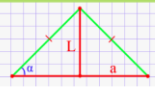
тест на угол откоса материала в печи

Тест сырого магнезита ($MgCO_3$)

Тест обожженного магнезита (MgO)



Угол при основании равнобедренного треугольника через биссектрису и основание.



Биссектриса (L): мм

Основание (a): мм

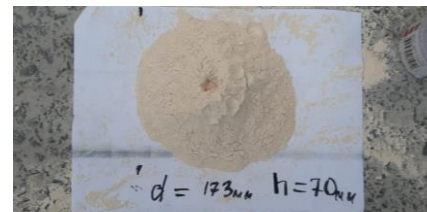
Результат в:

Цифр после запятой:

Угол(α) = 38.98147 градус

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{L}{\frac{a}{2}}$$

Где: L - биссектриса, a - основание.



Угол при основании равнобедренного треугольника через биссектрису и основание.



Биссектриса (L): мм

Основание (a): мм

Результат в:

Цифр после запятой:

Угол(α) = 32.81428 градус

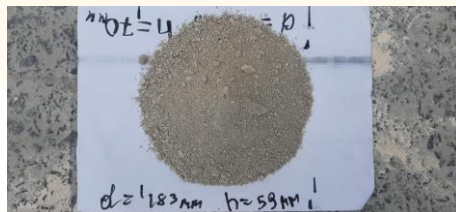
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{L}{\frac{a}{2}}$$

Где: L - биссектриса, a - основание.



практические наработки

Тест сырого магнезита ($MgCO_3$)



Угол при основании равнобедренного треугольника через биссектрису и основание.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{L}{\frac{a}{2}}$$

Где: L - биссектриса, a - основание.

Биссектриса (L): мм

Основание (a): мм

Результат в:

Цифр после запятой:

Угол(α) = 38.98147 градус

моделирование процесса обжига магнезита в многоподовой печи

тест на угол откоса материала в печи

визуализация эксперимента

Simcenter STAR-CCM+

Maximum - Particle Z Coordinate: 0.149808 (m)
Maximum - Particle X Coordinate: 0.0324713 (m)
Expression - Angle Of Repose: 77.7702
Element Count - Particle: 882

Maximum - Particle Kinetic energy: 0.000348289 (J)

Solution Time 0.1 (s)

Particle Velocity: Magnitude (m/s)
< 0 0.125 > 0.25



благодарности

выражаю благодарность сотрудникам Группы Магнезит:

- ▶ 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



[сайт Группы Магнезит](#)