

## Автоматизированное проектирование для исследования зон в многоподовой печи

Борзов Андрей Николаевич

к.т.н., инженер – технолог

XXII Конференция огнеупорщиков  
и металлургов, МИСиС, май 2025 г.



# 1

## основные сведения многоподовой печи

- ▶ характеристики печи
- ▶ принцип работы
- ▶ входные и выходные параметры обжига
- ▶ явления, происходящие в печи

# 2

## задачи и методы проектирования

- ▶ вариация геометрии колодцев (диаметров, высот) и наклона подов
- ▶ вариация рукоятей на центральном вале
- ▶ вариация форм скребков, углов их атаки и количества на рукояти
- ▶ вариация зон защитных устройств центрального вала
- ▶ вариация слоя материала на подах
- ▶ создание согласованной расчетной сетки
- ▶ алгоритмический способ построения расчетных зон
- ▶ алгоритмическая подмена расчетной подобласти
- ▶ Java программирование

# 3

## результаты

- ▶ работа интерфейса вариация геометрии колодцев
- ▶ работа интерфейса вариации скребков, углов их атаки и количества на рукояти
- ▶ работа скрипта построения зон движения материала в печи
- ▶ результат согласованной расчетной сетки всех зон
- ▶ результат расчета газодинамики движения газа в печи
- ▶ результат расчета температуры в зоне движения материала

# 4

## выводы

- ▶ выводы по созданию расчетных зон
- ▶ выводы по работе интерфейсов
- ▶ выводы по автоматизации построения мат модели через набор скриптов
- ▶ благодарности



# 1

## ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ МНОГОПОДОВОЙ ПЕЧИ

# 1. основные сведения многоподовой печи

Многоподовая печь Бета Рекорд 100-2, Комплекс плотносеченных порошков Рекорд. Саткинская производственная площадка Группы Магnezит



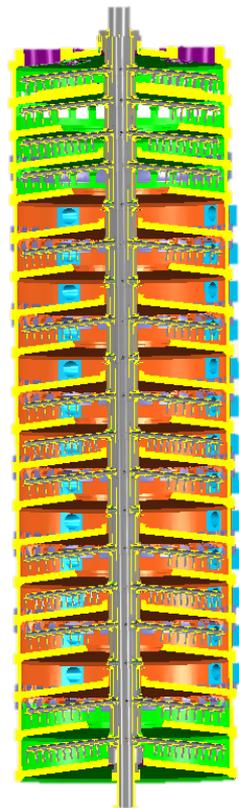
## характеристики многоподовой печи

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

# 1. основные сведения многоподовой печи



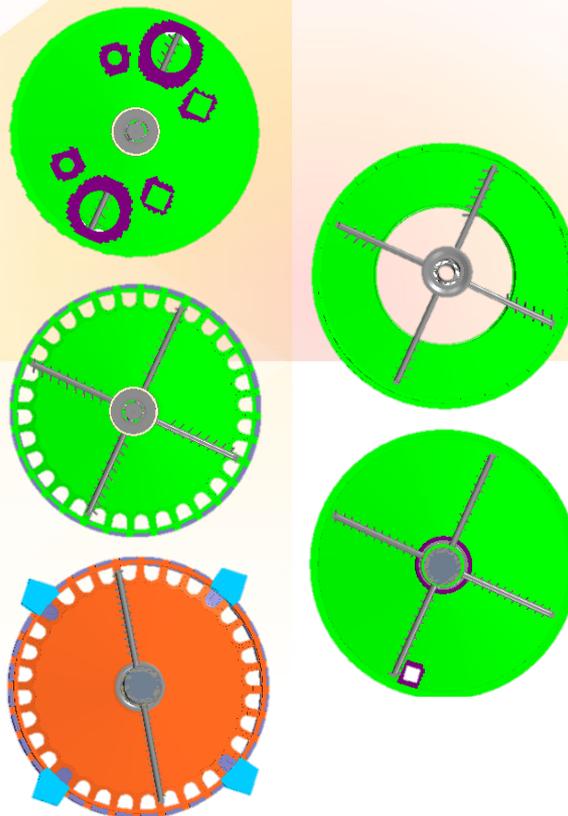
3D модель  
многоподовой печи



верхний и нижний  
песочный затвор печи



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



## принцип работы

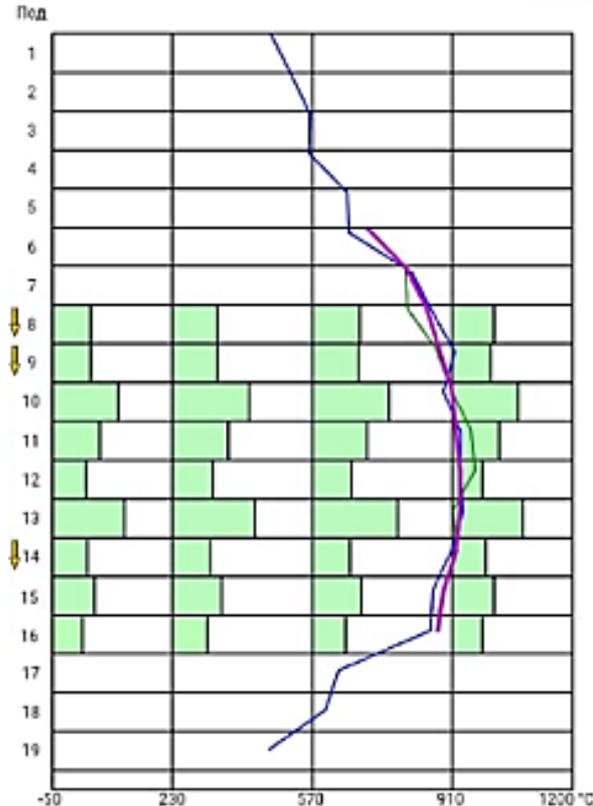
### зоны многоподовой печи

- ▶ зона предварительного нагрева материала (1-2 под)
- ▶ под 3-10 – зона кальцинации
- ▶ под 11-16 – зона подачи каустика
- ▶ под 17-19 – зона охлаждения
- ▶ на подах 5-17 есть 4 горелки с направленным пламенем по касательной
- ▶ зона охлаждения вращающего центрального вала с рукоятями и лопатками

# 1. основные сведения многоподовой печи



задание характера обжига магнезита в печи оператором



## 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
- ▶ расход газа охлаждения центрального вала, расход  $\text{CH}_4$  и воздуха горения ( $\text{м}^3/\text{ч}$ )

### 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 (5 -17 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 во вращающей печи. Москва, МИСиС, 2019. КОиМ;
2. Борзов А.Н. Моделирование обжига магнезита в кольцевой печи. Сатка, 2019. Конференция;
3. Борзов А.Н. Моделирование обжига магнезита в многоподовой печи. Москва, МИСиС, 2023. КОиМ;
4. Борзов А.Н. Исследование движения и свойств магнезита в многоподовой печи. Москва, МИСиС, 2024. КОиМ;



# явления, происходящие в печи

видео образования борозд материала на поде печи от вращения рукоятей



- ▶ 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.



# 2

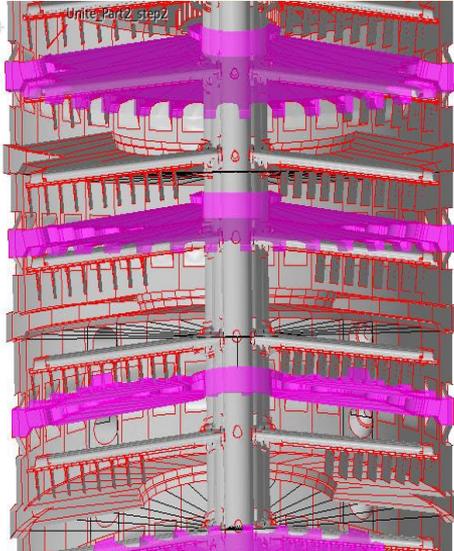
## задачи и методы проектирования



# вариация геометрии колодцев (диаметров высот) и наклона подов

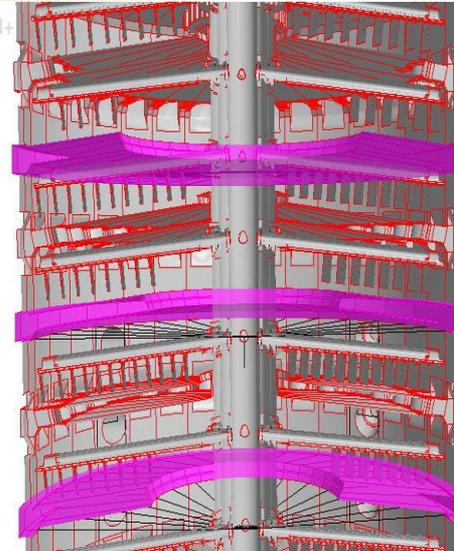
Нечетный под – может быть с большим или с малым проходным колодцем. Начиная с 3-го нечетного пода существует заглушка под горелочным блоком

Simcenter STAR-CCM+



Четный под – может быть выстроен из 2 – 18 клинообразных кирпичей

Simcenter STAR-CCM+

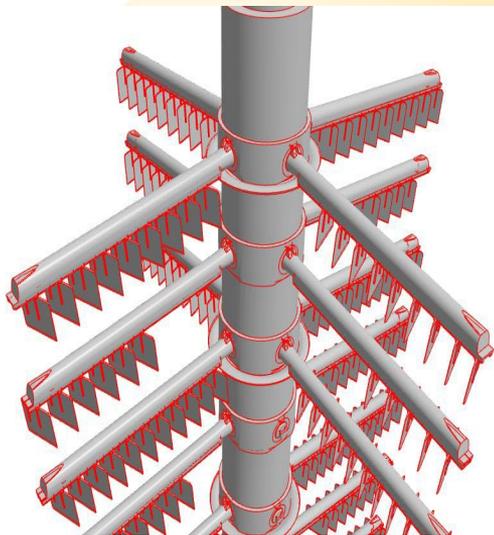




# вариация количества рукоятей на центральном вале

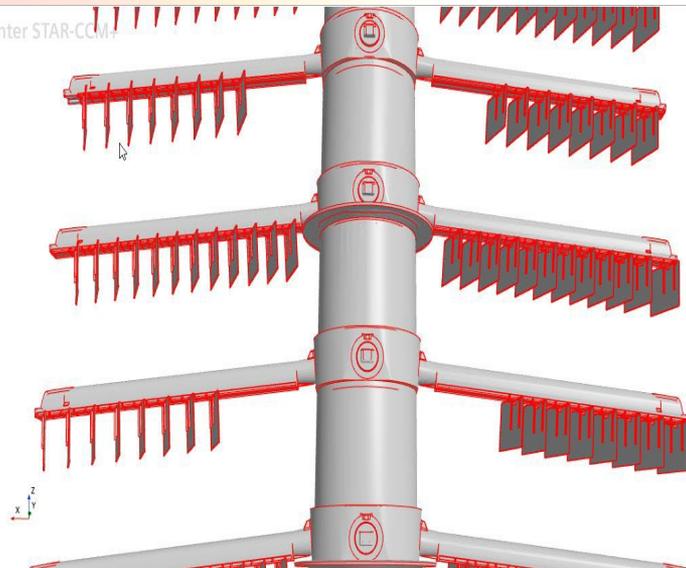
Присутствуют все 4 рукоятей

Simcenter STAR-CCM+



Присутствуют 2 из 4 рукоятей. В местах отсутствия рукоятей установлены заглушки

Simcenter STAR-CCM+



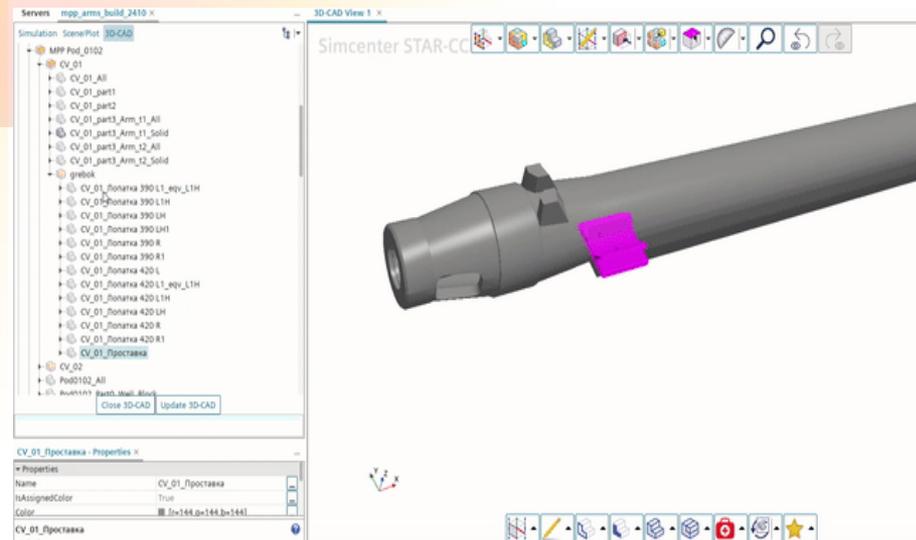


# вариация форм скребков, углов их атаки и количества на рукояти

Пример шифра двух рукоятей со скребками

0101	Вид в 3д	
	Шифр	<b>(1)(95+110+140)(8_Лопатка 390 R1)(7_Проставка 140)(1_Проставка 80)(1_Лопатка 390 LH)</b>
0102	Вид в 3д	
	Шифр	<b>(1)(95+95+95)(8_Лопатка 390 R1)(7_Проставка 140)(1_Проставка 140)(1_Лопатка 390 LH)</b>

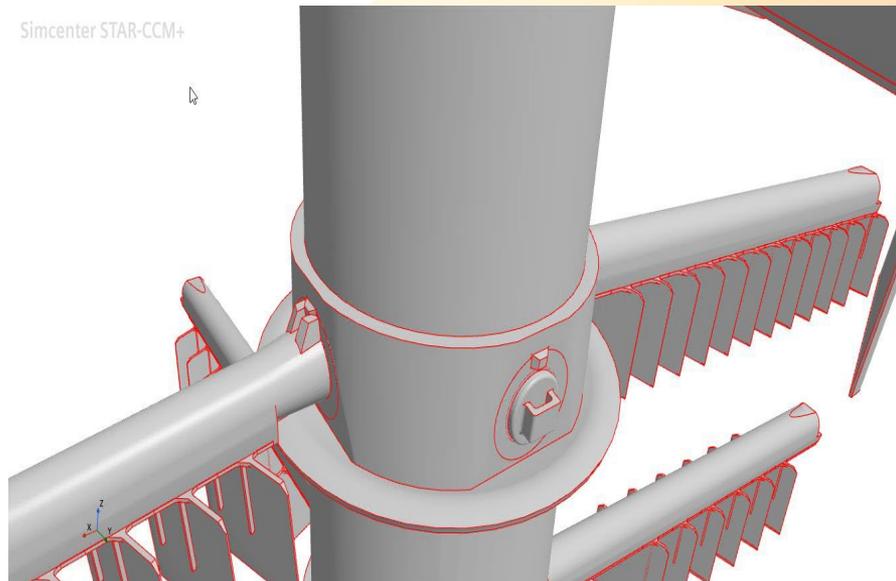
Виды скребков и проставок на одной рукояти



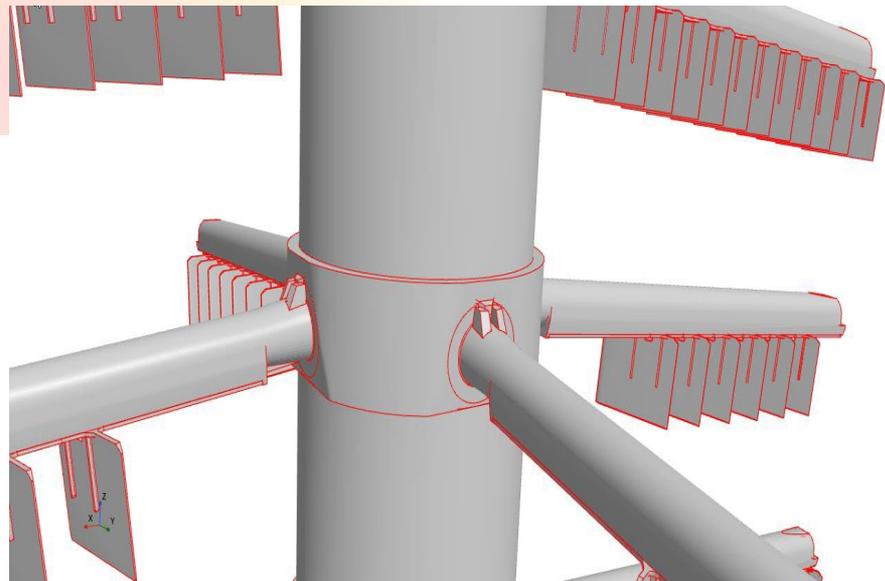
# вариация зон защитных устройств центрального вала

вариант 1 – Защита ЦВ присутствует

Simcenter STAR-CCM+



вариант 2 – Защита ЦВ отсутствует

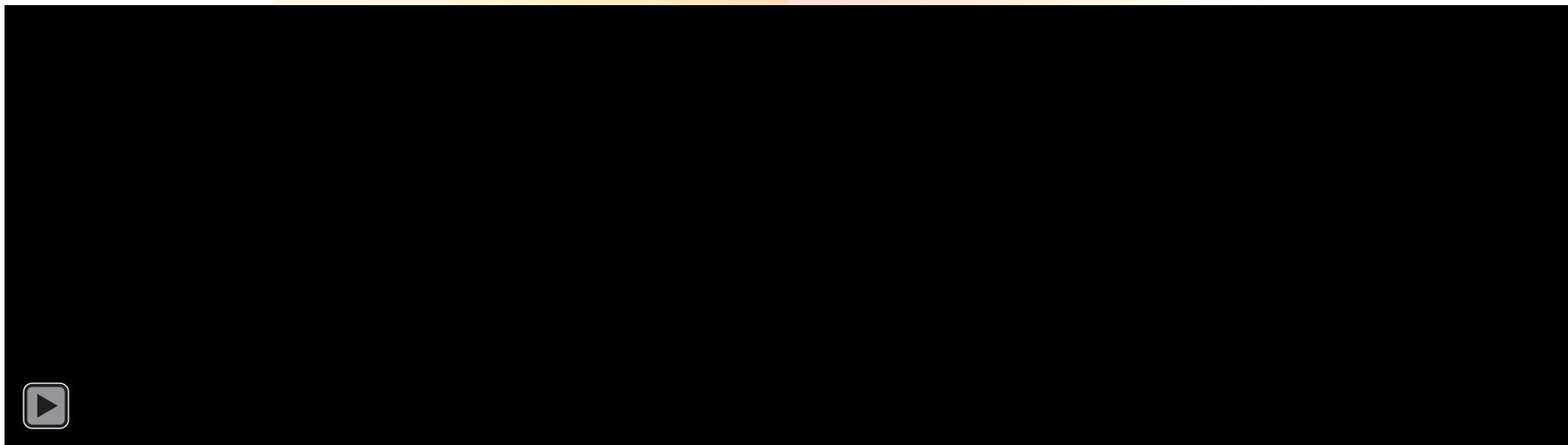




# вариация слоев материала на подах

Получение формы и высот  
статического 3-х слойного слоя для  
материала на подах по результатам  
DEM расчета

визуализация результатов движения материала





# создание согласованной расчетной сетки

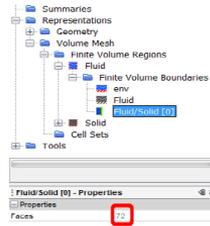
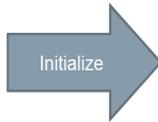
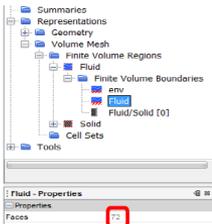
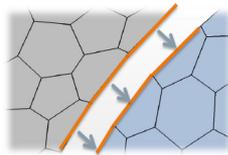
вариант 1 – Согласованная расчетная сетка

### Meshing – Conformal Meshing/Interfaces



A conformal mesh is desirable for accuracy, so what exactly is a conformal mesh?

- Cells share the same vertices at the interface
- One-to-one face match
- Smooth heat transfer across regions
- Not much to worry about in terms of the interfaces



Требование программы Star CCM+ к расчетной сетке при одновременном расчете зоны твердого тела и зоны газа (Conjugate heat transfer)

вариант 2 – Несогласованная расчетная сетка

### Meshing – Non-Conformal Meshing



- When generating a non-conformal mesh, face matching at the interface is important
- If there are large gaps or changes in mesh resolution across the interface, the solver may not be able to split and match all faces
- Unmatched faces will not be included in interface calculations
- Effectively treated as walls, meaning they are adiabatic
- These faces can be visualized in a mesh scene
- Unmatched faces show as default grey wall

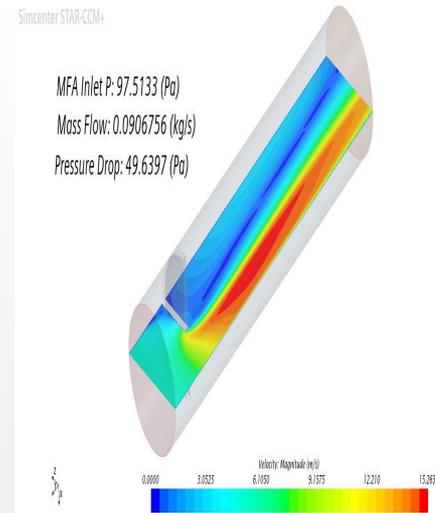
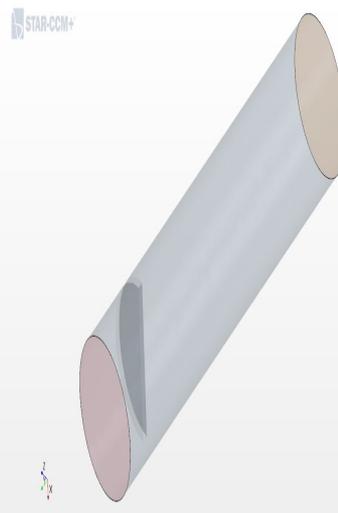
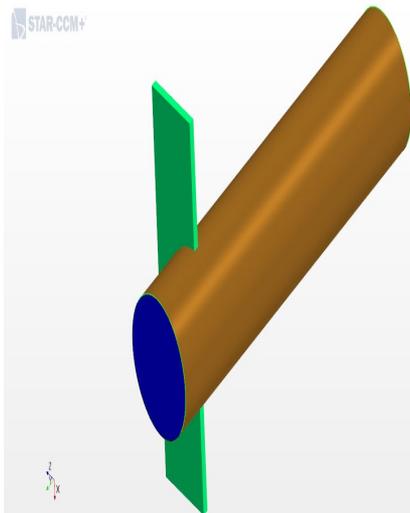
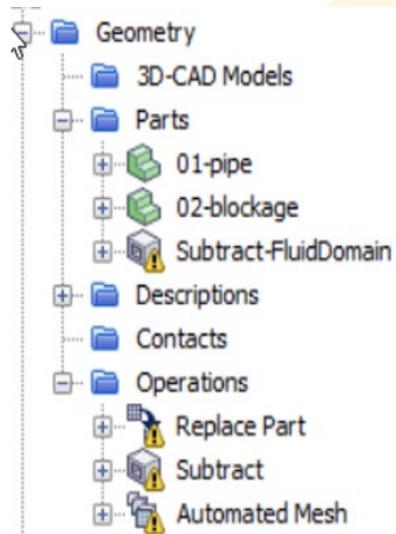


Unrestricted © Siemens AG 2018



# алгоритмический способ построения расчетной области

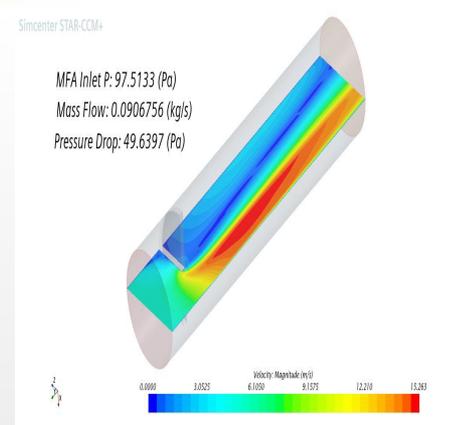
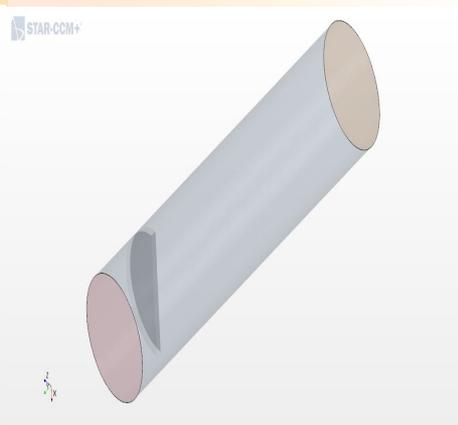
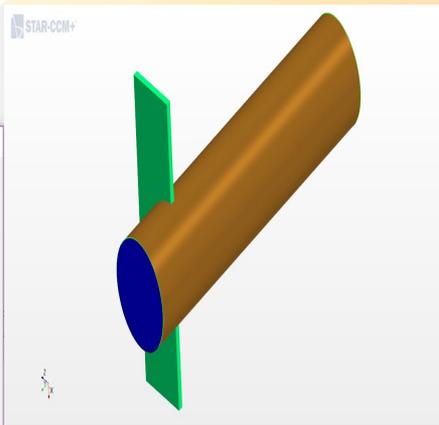
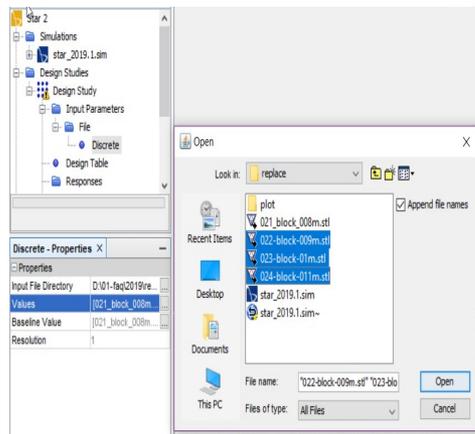
Технология  
Part Base Meshing Star CCM+





# алгоритмическая замена расчетной подобласти

Технология  
Replace Part Star CCM+



Design #	Name	State	MFA Inlet P	Mass Flow	Pressure Drop	Performance	File
1	Design 1	✓	22.5962939 Pa	0.0909004 kg/s	16.5070016 Pa	1.0	021_block_008m.stl
2	Design 2	✓	40.1827106 Pa	0.0908856 kg/s	28.1857732 Pa	1.0	022-block-009m.stl
3	Design 3	✓	86.1725861 Pa	0.0908838 kg/s	46.8817623 Pa	1.0	023-block-01m.stl
4	Design 4	✓	165.1645039 Pa	0.0909075 kg/s	87.3381317 Pa	1.0	024-block-011m.stl



# программирование JAVA

```
// Metric - "mm" or "m"
public void create_automesh(double BaseSize, double PrismaLayers_Thickness, String Metric, int PrismaLayers_Count){
    Simulation simulation_0 = sim;

    AutoMeshOperation autoMeshOperation_0 = simulation_0.get(MeshOperationManager.class).createAutoMeshOperation(new StringVector{
    autoMeshOperation_0.getMesherParallelModeOption().setSelected(MesherParallelModeOption.Type.PARALLEL);

    Units units_1 = ((Units) simulation_0.getUnitsManager().getObject(Metric));
    autoMeshOperation_0.getDefaultValues().get(BaseSize.class).setValueAndUnits(BaseSize, units_1);

    NumPrismLayers numPrismLayers_0 = autoMeshOperation_0.getDefaultValues().get(NumPrismLayers.class);
    IntegerValue integerValue_0 = numPrismLayers_0.getNumLayersValue();
    integerValue_0.getQuantity().setValue(PrismaLayers_Count);

    PrismThickness prismThickness_0 = autoMeshOperation_0.getDefaultValues().get(PrismThickness.class);
    prismThickness_0.getRelativeOrAbsoluteOption().setSelected(RelativeOrAbsoluteOption.Type.ABSOLUTE);
    ((ScalarPhysicalQuantity) prismThickness_0.getAbsoluteSizeValue()).setValueAndUnits( PrismaLayers_Thickness, units_1);

    SurfaceCustomMeshControl surfaceCustomMeshControl_0 = autoMeshOperation_0.getCustomMeshControls().createSurfaceControl();
    PartsCustomizePrismMesh partsCustomizePrismMesh_0 = surfaceCustomMeshControl_0.getCustomConditions().get(PartsCustomizePrism
    partsCustomizePrismMesh_0.getCustomPrismOptions().setSelected(PartsCustomPrismOption.Type.DISABLE);
```



Автоматизированное проектирование для исследования зон в многоподовой печи

## Java scripting Star CCM+

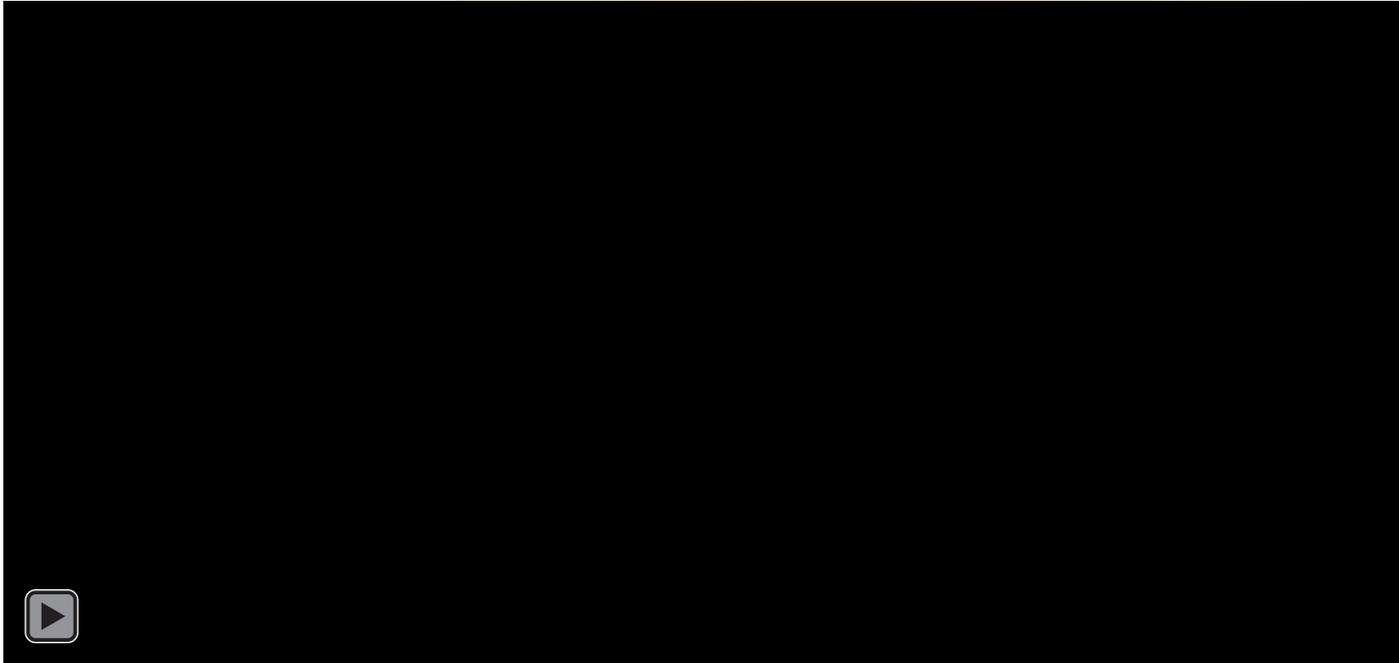
- ▶ программировать любые действия в программе Star CCM+ от создания 3д геометрии, операций создания варьируемого параметра, операций построения расчетных зон, мешинга, создание регионов с граничными условиями и постобработкой результатов расчета;
- ▶ программирование в виде классов ООП;
- ▶ создание собственных удобных интерфейсов ввода данных;
- ▶ подключение любых сторонних java библиотек (работа с excel файлами, управление голосом, ИИ т.д.)



# 3 результаты

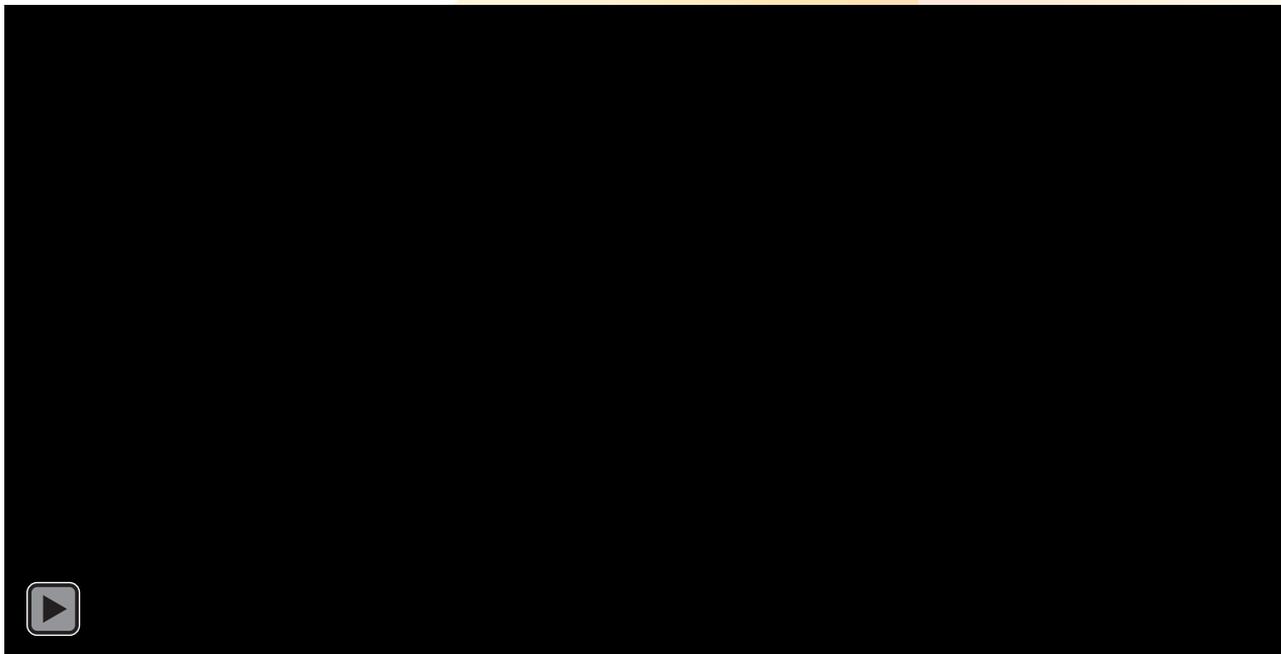


# работа интерфейса вариация геометрии колодцев





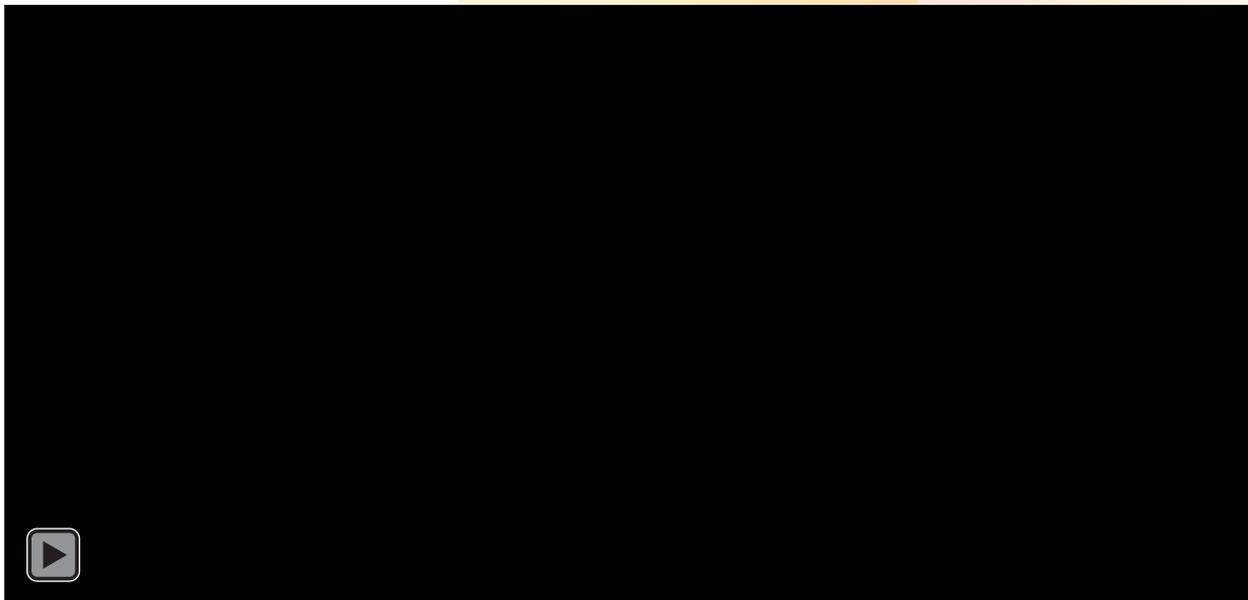
# работа интерфейса вариации скребков, углов их атаки и количества на рукояти



Задание  
характеристик  
рукоятей со скребками  
для отдельного уровня  
многоподовой печи  
исходя из его шифра



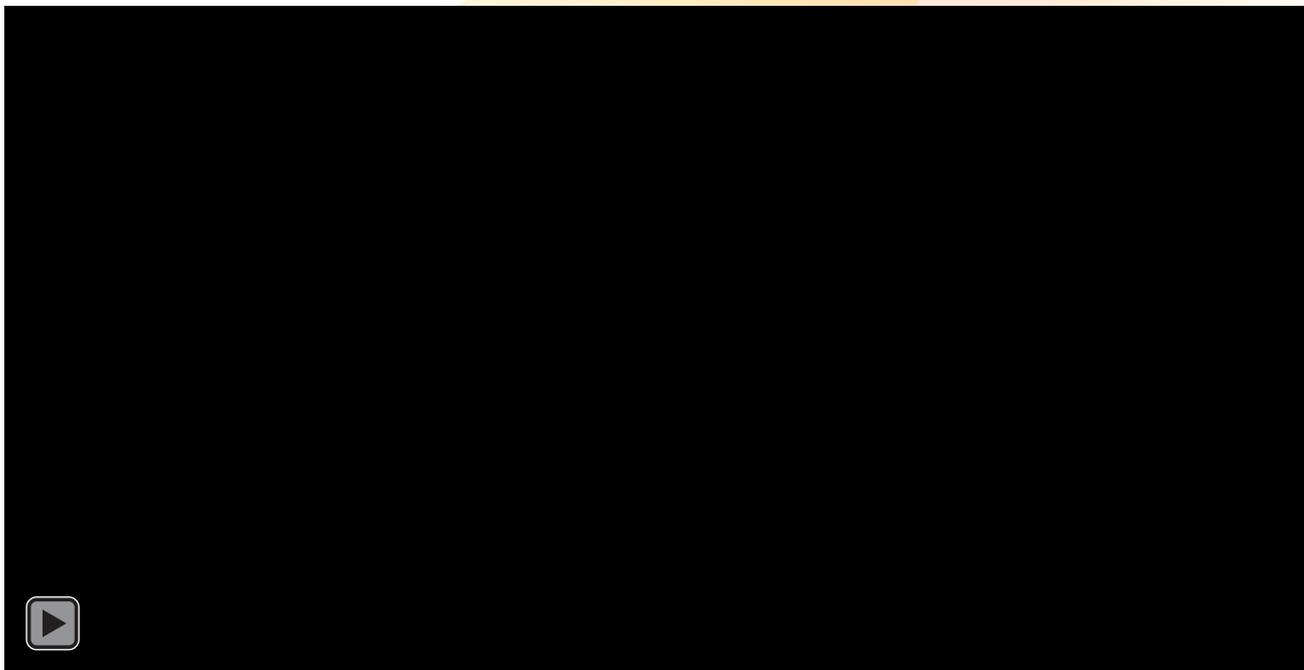
# работа интерфейса вариации скребков, углов их атаки и количества на рукояти



Запись /чтение  
выбранной  
конфигурации-набора  
шифров для уровней  
через программный  
интерфейс в Star CCM+  
в Exel файл

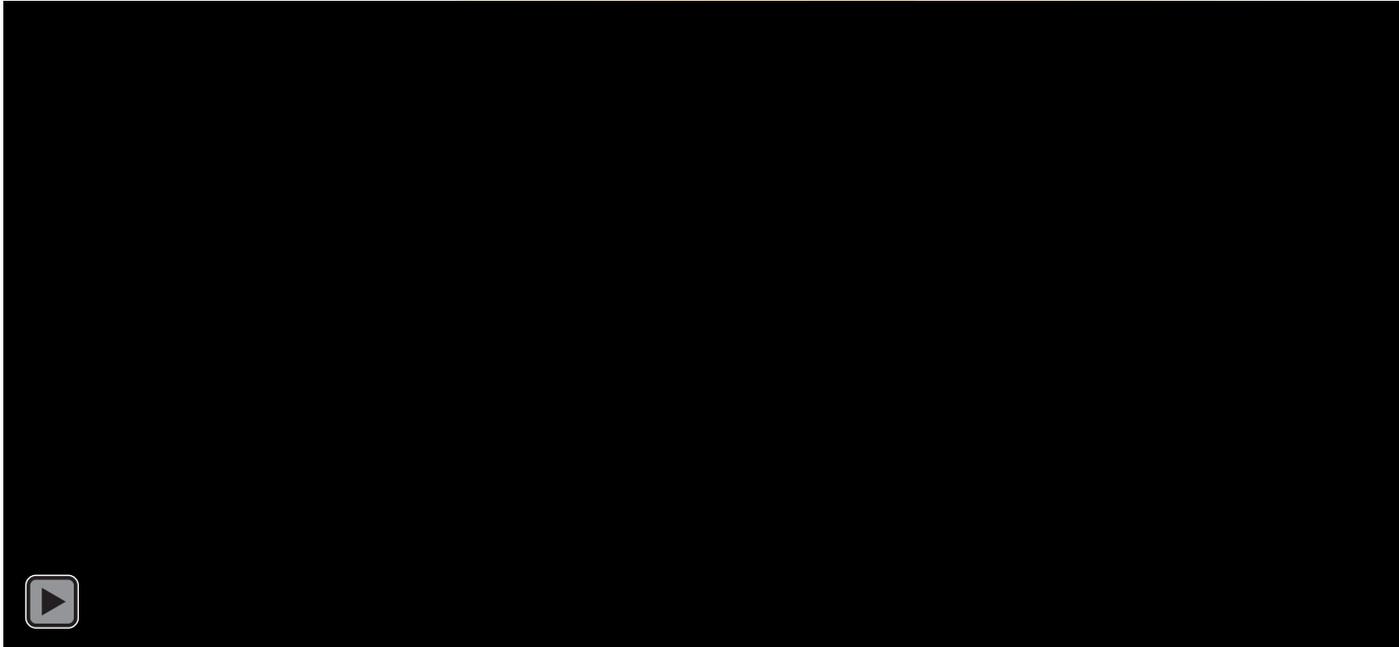


# работа скрипта построения зоны движения материала в печи





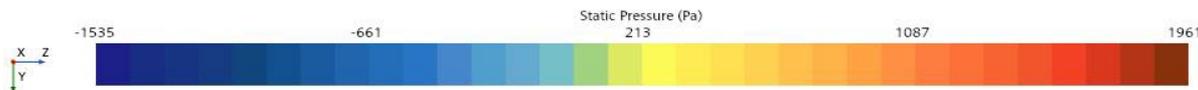
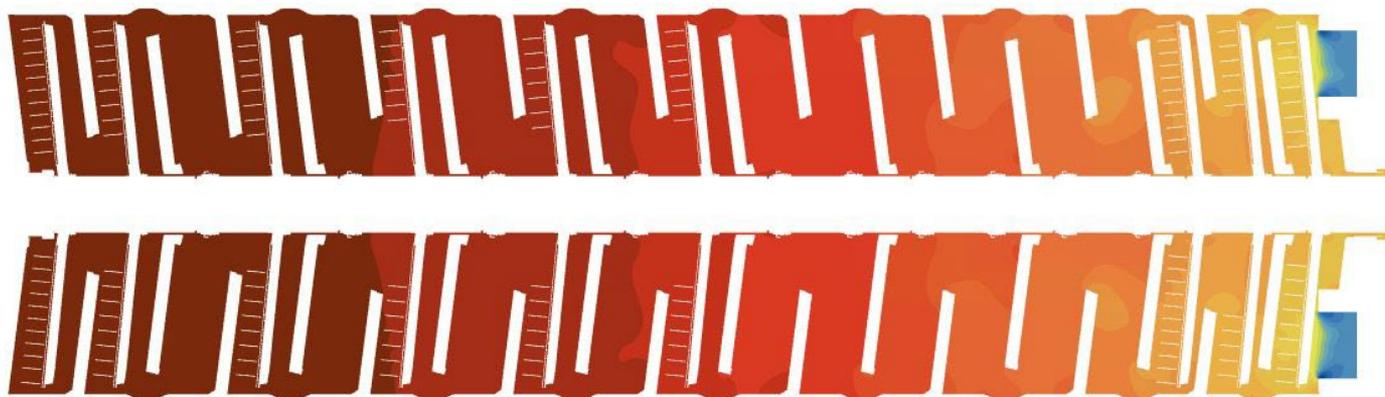
# результат согласованной расчетной сетки для всех зон многоподовой печи





# результат расчета газодинамики движения газа в печи

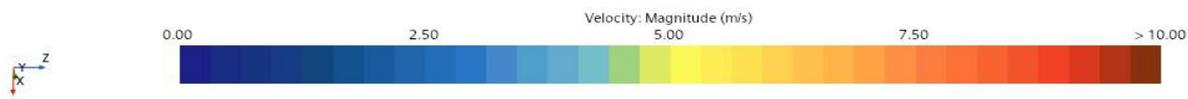
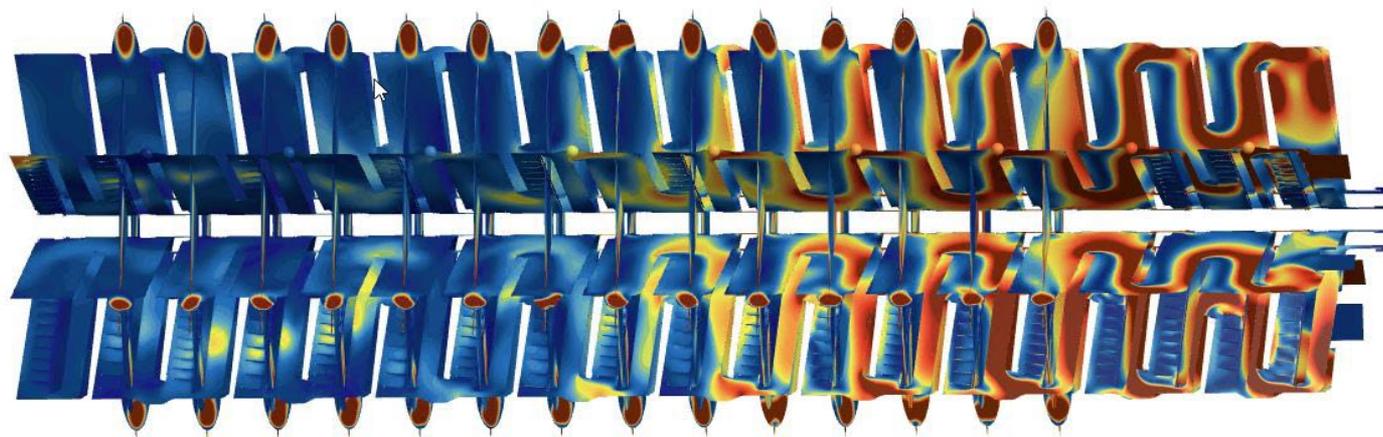
Simcenter STAR-CCM+





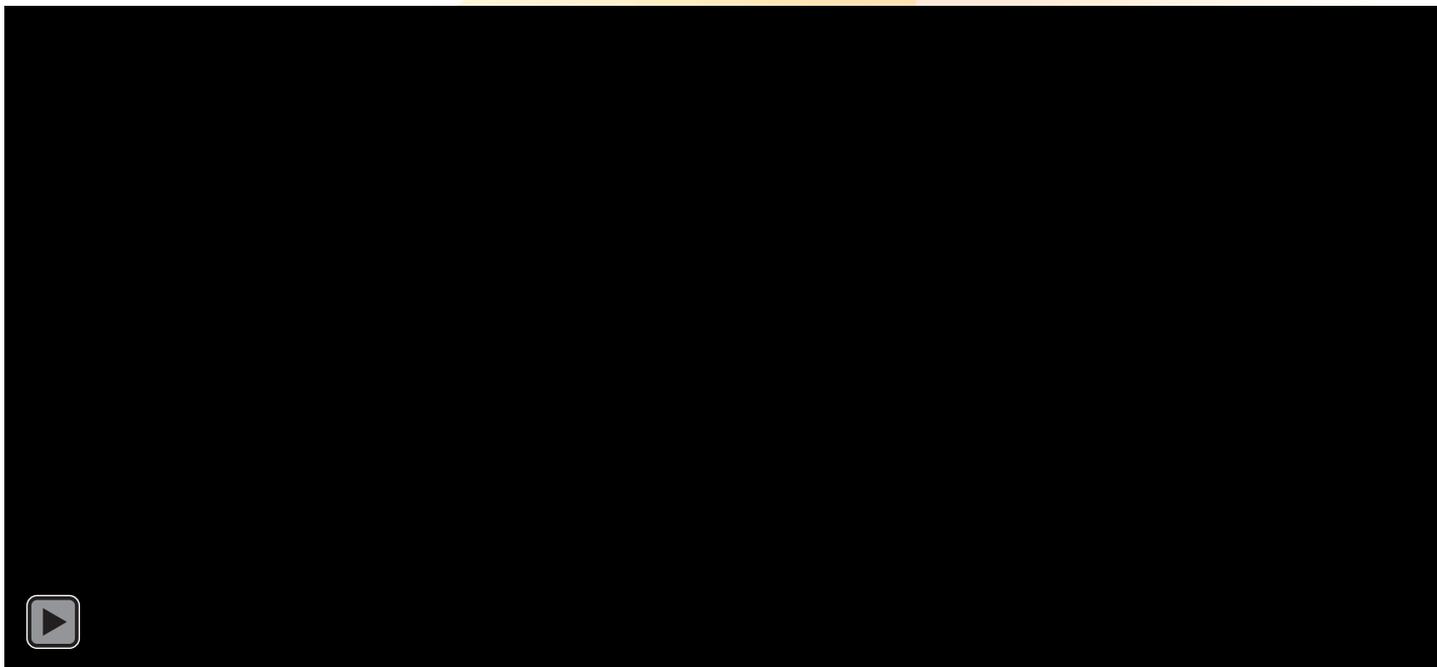
# результат расчета газодинамики движения газа в печи

Simcenter STAR-CCM+





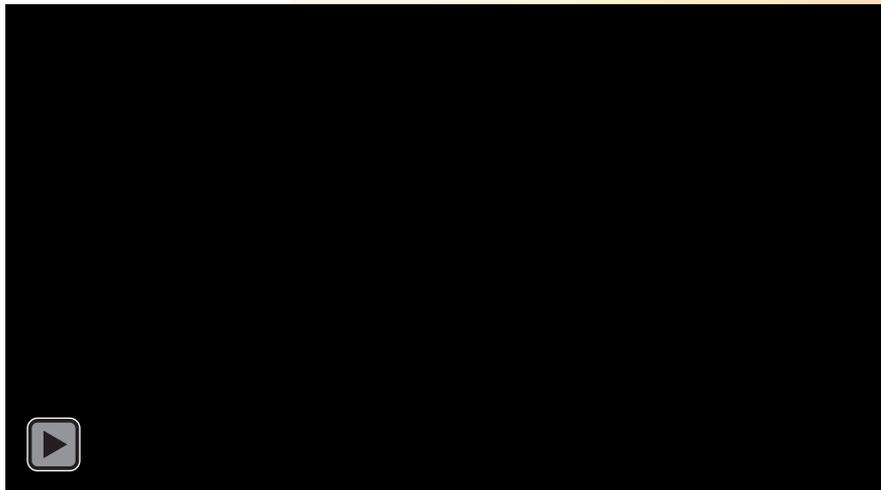
# результат расчета газодинамики движения газа в печи



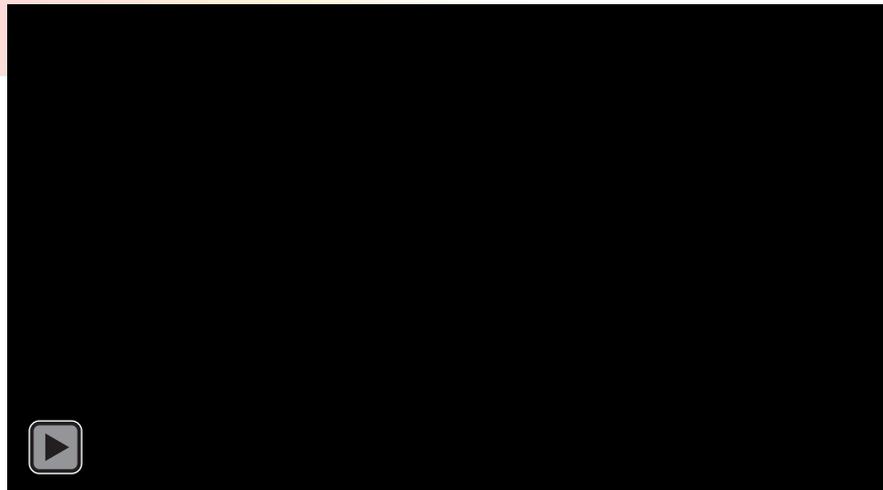


# результат расчета газодинамики движения газа

Движение газа на 6 поде МПП



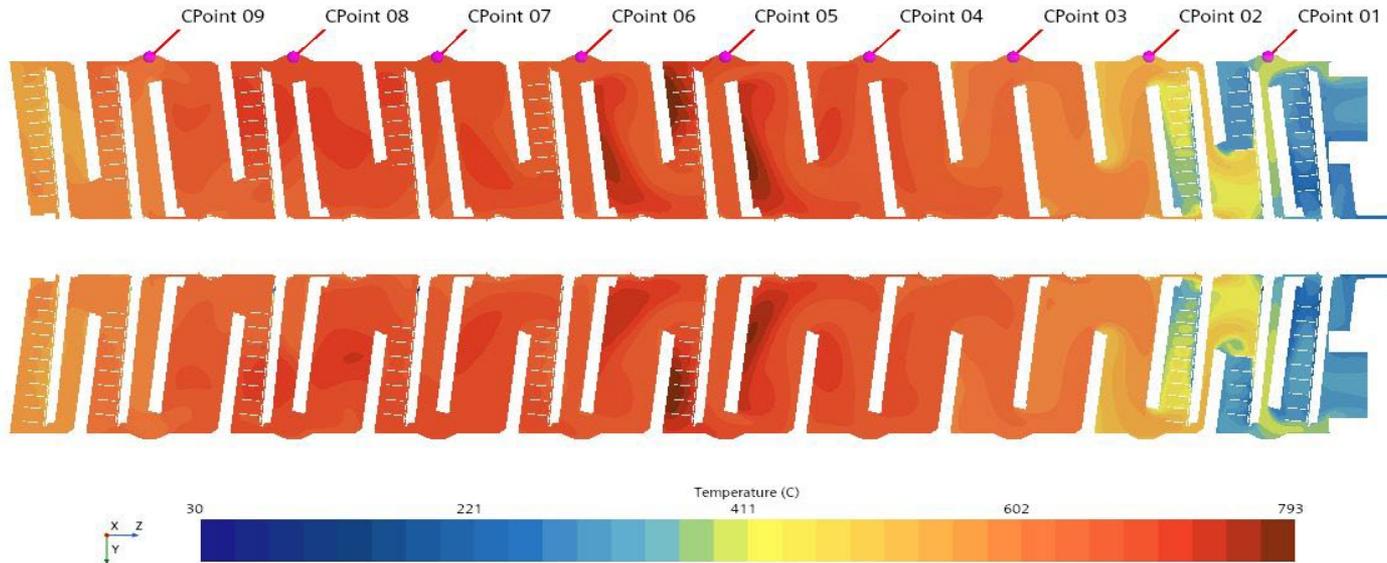
Движение газа на 7 поде МПП





# результат расчета температуры зоны движения газа

Simcenter STAR-CCM+

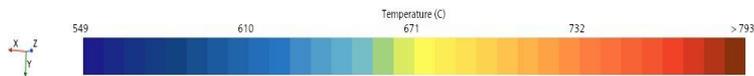
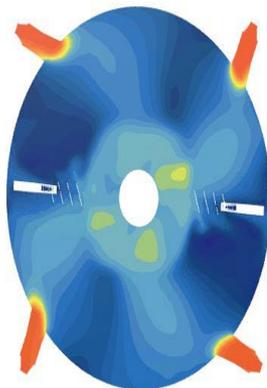




# результат расчета температуры зоны движения газа

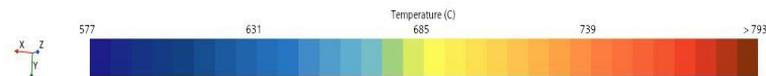
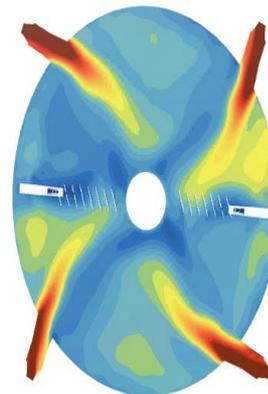
Температура на 6 поде МПП

Simcenter STAR-CCM+



Температура на 7 поде МПП

Simcenter STAR-CCM+



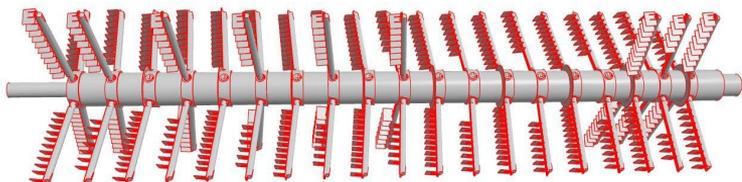


# 4

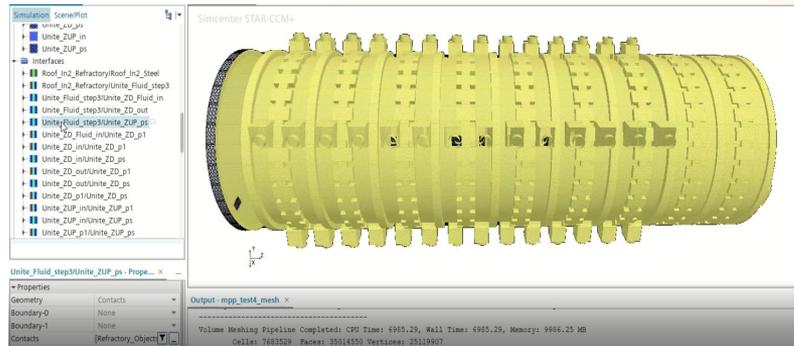
## ВЫВОДЫ

# ВЫВОДЫ ПО СОЗДАНИЮ РАСЧЕТНЫХ ЗОН

Конфигурация центрального вала с рукоятями и лопатками в МПП



Интерфейсы между подзонами МПП

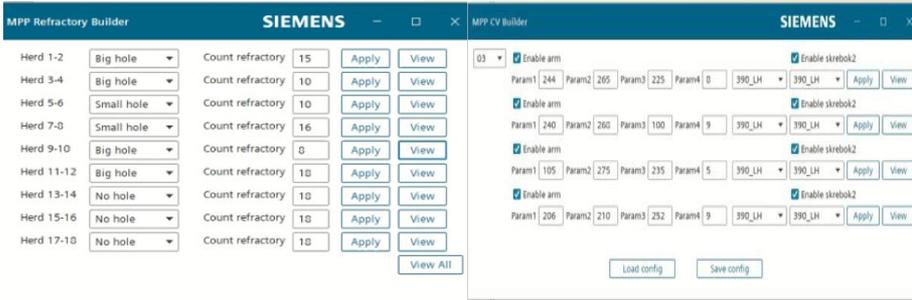


- ▶ Представленный алгоритмический метод позволяет строить через технологию Part Base Meshing и Replace Part различные конфигурации 3д модель МПП с множеством подзон, которые отвечают за движения газа, материала, области горелочных фурм, входа и выхода отходящих газа верхних и нижних затворов, футеровок, рукояти с лопатками центрального вала и и металлических конструкций МПП;
- ▶ Все подзоны МПП согласованы между собой по расчетной сетки и пригодны для CFD, Solid Mechanical и СНТ(conjugate heat transfer) расчетов

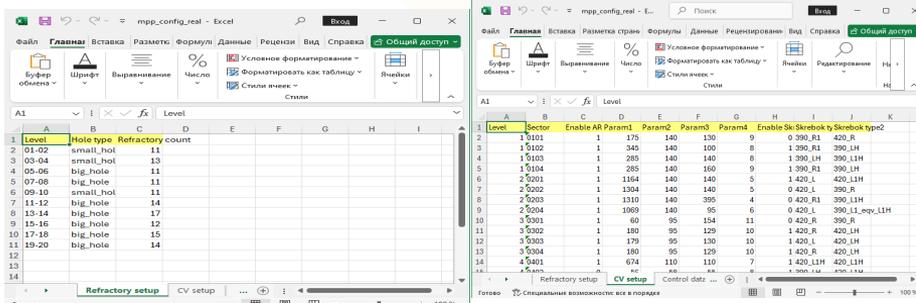


## Выводы по работе интерфейсов

Интерфейсы задания конфигурации МПП для футеровки и центрального вала



Пример данных одного дизайна МПП и ее рабочих условий



Исследование движения и свойств магнетита в многоподовой печи

Представленные интерфейсы позволяют:

- ▶ уменьшить в несколько раз трудоемкость построения нового 3д дизайна многоподовой печи (МПП) (внешняя футеровка, футеровка ЦВ, конфигурация рукоятей и скребков, входные граничные условия)
- ▶ исключить ошибки при ручном вводе данных для зон и сделать их гораздо более удобным для пользователя-исследователя;
- ▶ проанализировать множество вариаций дизайна и режимов работы;
- ▶ благодаря чтению/записи в многотабличный файл excel быстро и эффективно манипулировать большим набором данным

# Выводы по автоматизации построения математической модели через набор скриптов

Пример набор скриптов для построение мат модели футеровки и центрального вала МПП и ее рабочих условий

Name	Ext	Size	Date	Name	Ext	Size	Date
<DIR>			24.04.2025 13:47	<DIR>			24.04.2025 13:46
run_all	java	3 957	20.04.2025 22:57	run_all	java	5 515	23.04.2025 22:42
step01_create_3d_model	java	2 092	20.04.2025 22:57	set_boundary	java	5 993	23.04.2025 18:46
step02_create_parts	java	854	20.04.2025 22:57	split_boundary_by_function	java	1 318	23.04.2025 18:57
step03_create_params	java	2 999	20.04.2025 22:57	step01_create_3d_model	java	2 651	20.04.2025 22:58
step04_create_replace_parts	java	5 534	20.04.2025 22:57	step02_create_params	java	7 712	23.04.2025 15:50
step05_create_translate	java	6 105	20.04.2025 22:57	step03_create_sketch_for_param	java	5 707	20.04.2025 22:58
step06_make_fluid_zone_herds	java	4 206	20.04.2025 22:57	step04_create_3d_params	java	7 101	23.04.2025 15:51
step07_cp_burner_blocks	java	5 950	20.04.2025 22:57	step05_create_parts	java	837	20.04.2025 22:58
step08_unite_operation_for_step07	java	14 555	20.04.2025 22:57	step06_create_replace_part	java	4 796	23.04.2025 15:52
step09_cp_refractory_and_fluid	java	19 222	20.04.2025 22:57	step07_create_coord	java	9 618	20.04.2025 22:58
step10_unite_operation_for_step09	java	17 556	21.04.2025 21:35	step08_create_coord_by_tr	java	2 216	20.04.2025 22:58
step11_unite_operation_add	java	11 498	21.04.2025 21:40	step09_create_tr_skebokks	java	5 743	23.04.2025 15:53
step12_imprint	java	6 039	20.04.2025 22:57	step10_create_lp_skebokks	java	4 201	23.04.2025 15:53
step13_create_physics_gas	java	1 756	20.04.2025 22:57	step11_create_tr_params	java	5 899	23.04.2025 15:54
step13_create_physics_solid_multipart	java	1 239	20.04.2025 22:57	step12_create_lp_params	java	3 886	23.04.2025 15:54
step14_run_all_operations	java	1 082	20.04.2025 22:57	step13_create_cp_arm	java	19 409	20.04.2025 22:58
				step14_create_rotate_zones	java	2 796	23.04.2025 15:55
				step14_create_unite_protect	java	2 792	20.04.2025 22:58
				step15_create_unite_01	java	10 729	23.04.2025 15:56
				step15_create_unite_3_new	java	6 745	23.04.2025 22:08
				step16_create_physics_gas	java	1 756	20.04.2025 22:58
				step16_create_physics_solid_multipart	java	1 239	20.04.2025 22:58
				step17_run_all_operations	java	1 085	20.04.2025 22:58
				step18_assign_parts_regions_new2	java	4 222	23.04.2025 22:39
				step19_create_automesh2	java	3 648	23.04.2025 22:40

Представленные скриптовые наборы позволяют:

- ▶ автоматизировано строить мат модель в стар ссм+ для центрального вала и футеровки МПП;
- ▶ исключить ошибки при ручном построении мат модели;
- ▶ проанализировать множество вариаций дизайна и режимов работы;
- ▶ легкость объединения разных подмоделей в одну большую модель;
- ▶ декомпозиция и сбор в одну мат модель из подмоделей от разных людей разработчиков стар-ссм+.



# благодарности

выражаю благодарность сотрудникам Группы Магnezит:

- ▶ Дацко Алексею Николаевичу,  
ведущему специалисту Департамента Корпоративного 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](#)