

# Моделирование обжига огнеупоров в туннельной печи

Борзов Андрей Николаевич

к.т.н., инженер – технолог



# 1

## анализ решения задачи моделирования туннельной печи

- ▶ общие сведения
- ▶ входные и выходные параметры
- ▶ контролируемые параметры
- ▶ идеология построения математической модели
- ▶ допущения принятые для создания математической модели

# 2

## нагрев и охлаждение огнеупоров в туннельной печи

- ▶ общие сведения
- ▶ типы установленных горелок
- ▶ верификационная модель горения природного газа в горелке
- ▶ взаимный теплообмен между продуктами сгорания, воздуха охлаждения и огнеупоров

# 3

## результаты расчетов

- ▶ горение природного газа в верификационной математической модели тестовой горелки
- ▶ горения природного газа в реальных горелках туннельной печи
- ▶ температуры нагрева/охлаждения огнеупоров в туннельной печи в зависимости от числа прогонок

# 4

## выводы

- ▶ анализ модельных решений
- ▶ рекомендации по обжигу огнеупоров в туннельной печи



# 1

## анализ решения задачи моделирования туннельной печи

# 1. анализ решения задачи моделирования туннельной печи

## габариты

общие сведения



### Параметры

▶ Длина	108000 мм
▶ Ширина	26250 мм
▶ Высота печной зоны	9560 мм
▶ Толщина футеровки	609 мм
▶ Вагонов	45 шт.

Фото действующей туннельной печи на комбинате Магнезит.  
Комплекс Обжиговых Изделий "Импульс".



Моделирование обжига огнеупоров в туннельной печи

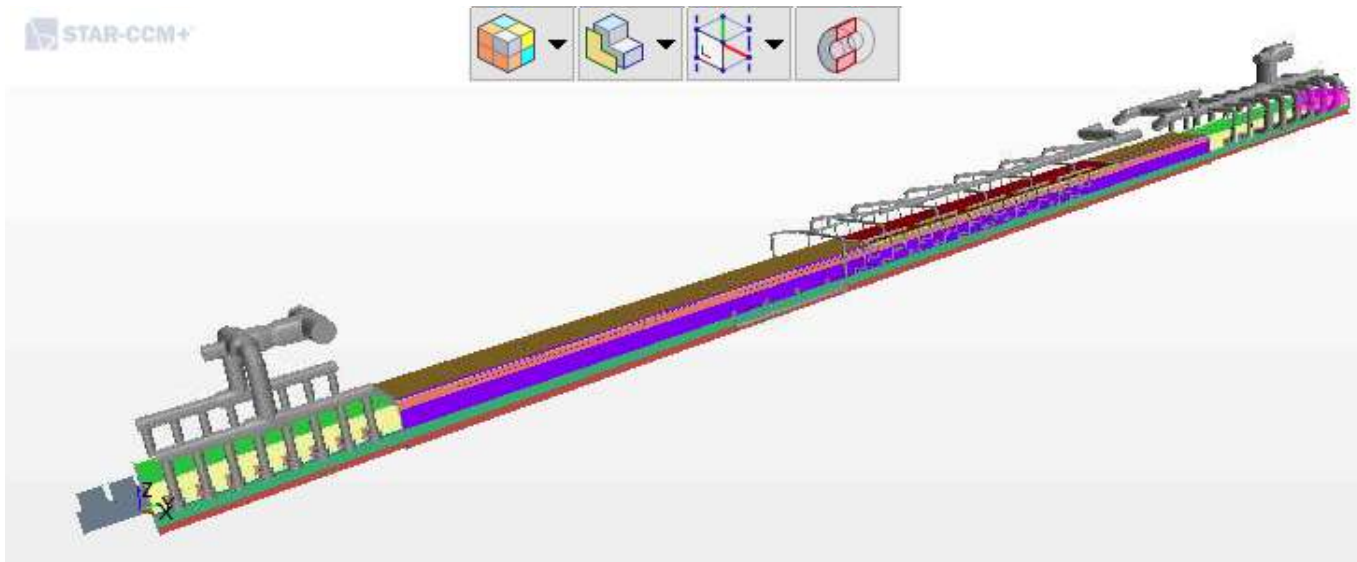
# принцип работы



## Зоны туннельной печи

- ▶ Зона предварительного нагрева огнеупора
- ▶ Зона обжига огнеупора
- ▶ Зона охлаждения огнеупора
- ▶ Зона воздушной завесы

Воссозданная 3д модель печи.



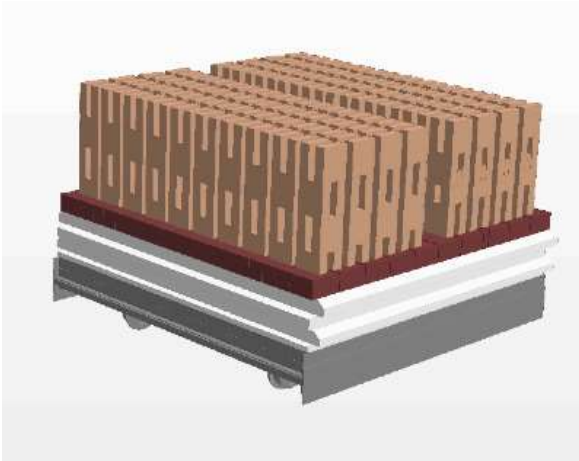


## ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

### Вагон с огнеупором

- ▶ Геометрия вагона и их кол-во в печи
- ▶ Кол-во прогонок вагонов в сутки
- ▶ Геометрия одного кирпича огнеупора
- ▶ Алгоритм кладки кирпича на вагоне
- ▶ Физико-химические свойства огнеупора на вагоне

3d модель вагона с огнеупорными кирпичами.



Моделирование обжига огнеупоров в туннельной печи

Построение кладки роботом по заданному алгоритму. Задание параметров в математической модели.



- Parameters
  - $X_s$  Air\_Burn\_Speed
  - $X_s$  Air\_Burn\_Temperature
  - $X_s$  Air\_Cooling\_Area
  - $X_s$  Air\_Cooling\_Common
  - $X_s$  Air\_Cooling\_Speed
  - $X_s$  Air\_Cooling\_Temperature
  - $X_s$  Air\_Preheat\_Area
  - $X_s$  Air\_Preheat\_Common
  - $X_s$  Air\_Preheat\_Speed
  - $X_s$  Air\_Preheat\_Temperature
  - $X_s$  Vag\_Count\_Progonok
  - $X_s$  Vag\_Simple\_Len
  - $X_s$  Vag\_Speed



## ВХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

### Технологические параметры

- ▶ Расход воздуха на вход в зоне подогрева
- ▶ Расход воздуха на вход в зоне охлаждения
- ▶ Расход воздухо-горения в одну группу горелок в зоне горения
- ▶ Расход природного газа в одну группу горелок в зоне горения
- ▶ Расход воздуха на вывод газа в зоне охлаждения

Фото действующей туннельной печи на комбинате Магнезит. Комплекс Обжиговых Изделий "Импульс".



Моделирование обжига огнеупоров в туннельной печи



## ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

### Технологические параметры

- ▶ Прочность огнеупора после обжига
- ▶ Отсутствие сколов и трещин после обжига
- ▶ Деформация огнеупора
- ▶ Термостойкость огнеупора
- ▶ Плотность огнеупора

Фото действующей туннельной печи на комбинате Магнезит.  
Комплекс Обжиговых Изделий "Импульс".



Моделирование обжига огнеупоров в туннельной печи





## контролируемые параметры

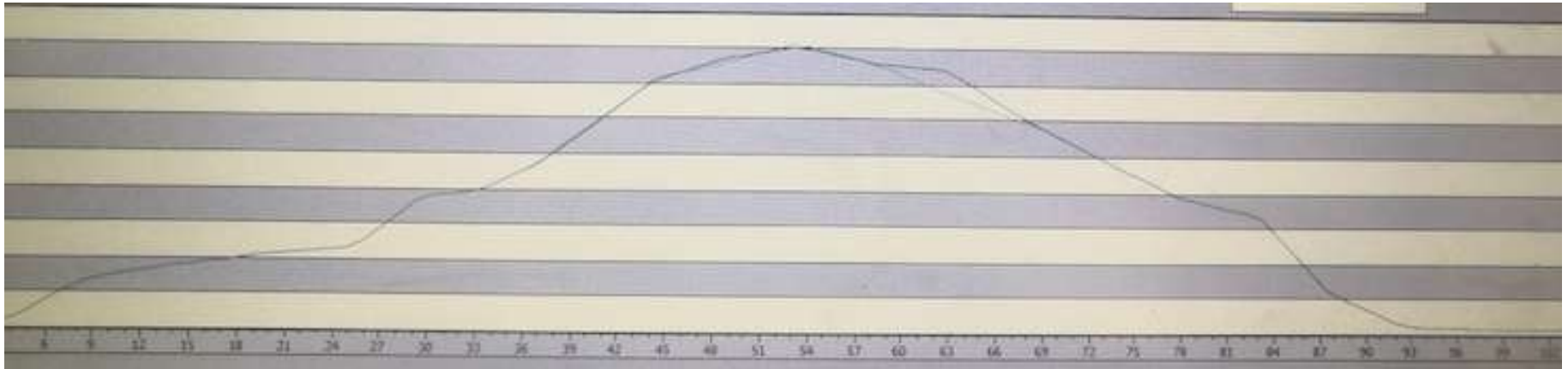
### Технологические параметры

Температурная кривая нагрева кирпичей в печи

- ▶ 10 термопар в зоне предварительного нагрева
- ▶ 5 пирометров в зоне обжига
- ▶ 10 термопар в зоне охлаждения

Расходы воздуха охлаждения с ручным регулированием угла открытия канала

Заданная оператором температурная кривая обжига.





# идеология построения математической модели

## Параметры математической модели

### Разбиение большой математической модели всей печи на подмодели малой размерности

- ▶ горелка с зоной горения
- ▶ канал вывода газа из печи в зоне подогрева
- ▶ канал вывода газа из печи в зоне охлаждения
- ▶ канал ввода газа в печь в зоне охлаждения

### Граничные условия

- ▶ вход – скорость потока газа со свойствами
- ▶ выход – давление

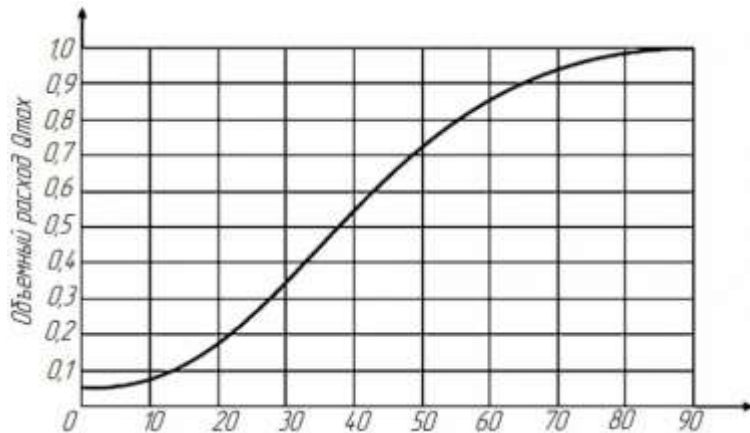
### Деление расчетной зоны по типу физики

- ▶ обжигаемый огнеупор
- ▶ газовый поток в зоне нагрева/обжига/охлаждения



## допущения принятые для создания математической модели

Вид зависимости степени пропускания воздуха через поворотную задвижку.



### Статическая постановка задачи моделирования

- ▶ входные и выходные параметры граничных условий const
- ▶ скорость движения вагонов const
- ▶ длина одного вагона const
- ▶ геометрия одного кирпича огнеупора на вагоне const
- ▶ алгоритм кладки огнеупорного кирпича на вагоне const
- ▶ физико-химические свойства огнеупора на вагоне const
- ▶ воздушные зазоры вырезаны и объединены с футеровкой
- ▶ функция степени открытия канала поворотной задвижки описывается функцией



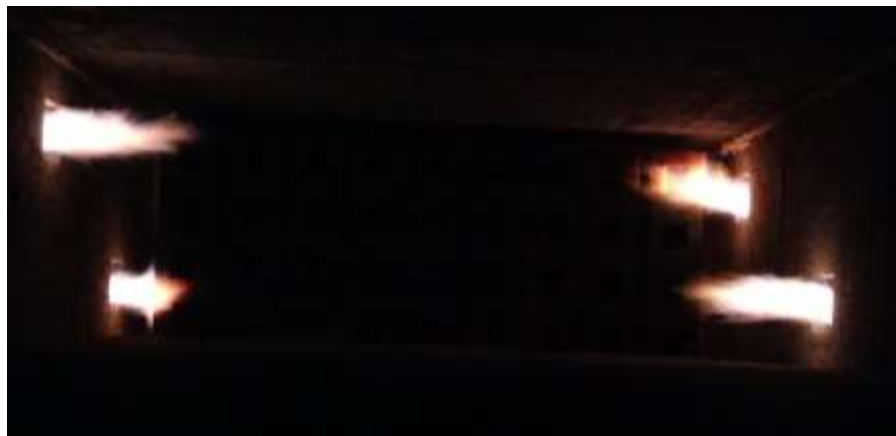
# 2

## нагрев и охлаждение огнеупоров в туннельной печи



# общие сведения

Работа реальных горелок для нагрева огнеупорных изделий.



Моделирование обжига огнеупоров в туннельной печи

## Технологические параметры

- ▶ Нагрев осуществляется 6 группами горелок
- ▶ Каждая группа состоит из 4 горелок расположенных в шахматном порядке
- ▶ 1 группа использует 1 тип горелок
- ▶ 2 – 6 группа использует 2 тип горелок
- ▶ Горелки в 1 и 6 группах работают как подающие элементы теплого воздуха горения без подачи природного газа
- ▶ Охлаждение в зоне предварительного отключено
- ▶ Охлаждение в зоне охлаждения огнеупорных изделий осуществляется одновременно с забором воздуха



# ТИПЫ установленных горелок

### Группы горелок

- ▶ Одна группа состоит из 8 горелок расположенные в шахматном порядке
- ▶ 1 группа      2 тип горелки
- ▶ 2-6 группа    1 тип горелки

Фото горелки 1 типа.



Воссозданная 3d модель горелки 1 типа.



Фото горелки 2 типа.



Воссозданная 3d модель горелки 2 типа.

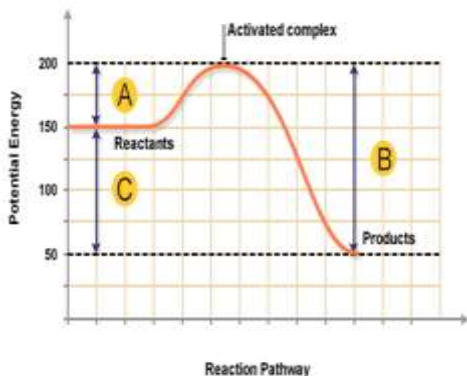




# верификационная модель горения природного газа в горелке

Задание химических уравнений  
и решателя для математической модели  
горения природного газа

- Complex Chemistry
- Chemistry Acceleration
- CVODE
- Acceleration Factor



$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot c^n$$

$$k = A \cdot e^{\frac{-E_a}{R \cdot T}}$$

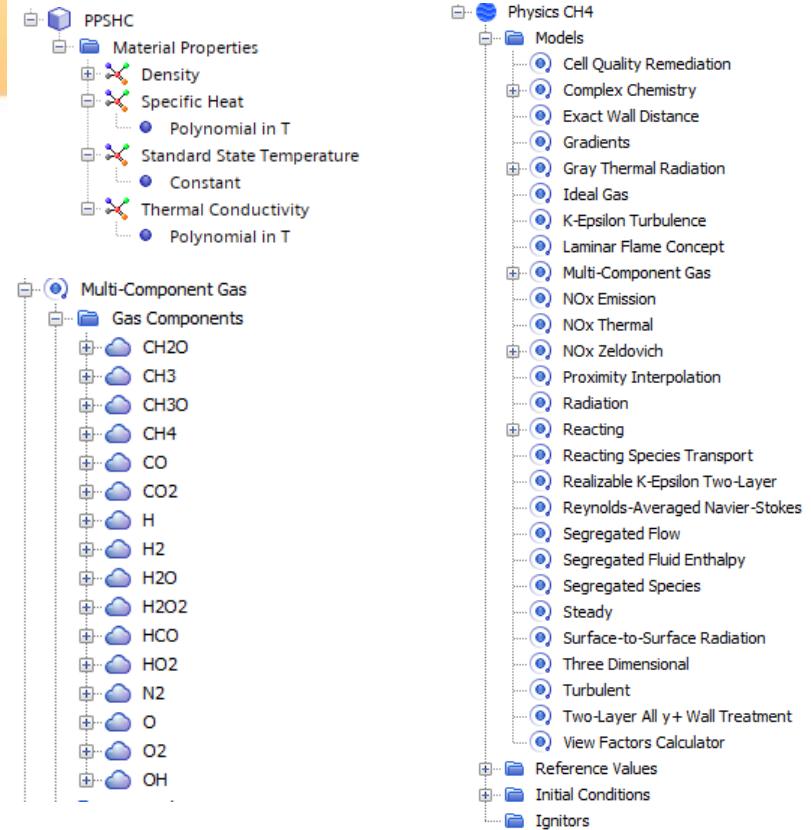
- CH2O+CH3=HCO+CH4
- CH2O+M=HCO+H+M
- CH3+O=CH2O+H
- CH3+OH=CH2O+H2
- CH3+O2=CH3O+O
- CH3+O2=CH2O+OH
- CH3+HO2=CH3O+OH
- CH3+HCO=CH4+CO
- CH4(+M)=CH3+H(+M)
- CH4+H=CH3+H2
- CH4+O=CH3+OH
- CH4+O2=CH3+HO2
- CH4+OH=CH3+H2O
- CH4+HO2=CH3+H2O2
- CH3O+H=CH2O+H2
- CH3O+OH=CH2O+H2O
- CH3O+O2=CH2O+HO2
- CH3O+M=CH2O+H+M
- H+O2=OH+O
- O+H2=OH+H
- OH+H2=H2O+H
- OH+OH=O+H2O
- H+H+M=H2+M
- H+OH+M=H2O+M
- H+O2+M=HO2+M
- HO2+H=OH+OH
- HO2+H=H2+O2
- HO2+O=O2+OH
- HO2+OH=H2O+O2
- H2O2+M=OH+OH+M
- CO+OH=CO2+H
- CO+O+M=CO2+M
- HCO+H=H2+CO
- HCO+O=OH+CO
- HCO+OH=H2O+CO
- HCO+O2=HO2+CO
- HCO+M=H+CO+M
- CH2O+H=HCO+H2
- CH2O+O=HCO+OH
- CH2O+OH=HCO+H2O
- CH2O+O2=HCO+HO2

Marsi, A.R., Dibble, R.W., and Barlow, R.S. 1996. "The structure of turbulent nonpremixed flames Revealed by Raman-Rayleigh-LIF measurement" Prog. Energy Combust. Sci. 22(4): pp.307-362



# взаимный теплообмен между продуктами сгорания, воздуха охлаждения и огнеупоров

## Газовая/твердая фазы



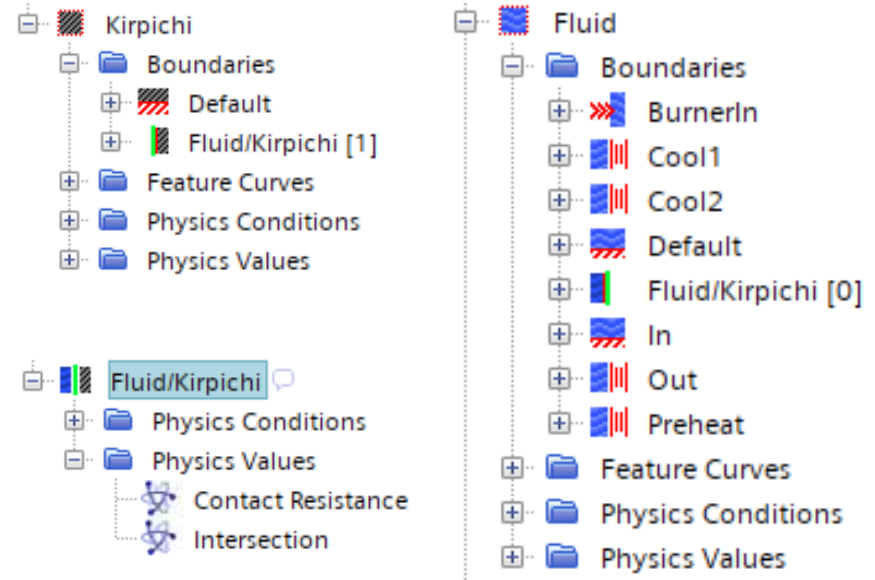
Настройка фаз  
теплообмена  
в математической модели.





# взаимный теплообмен между продуктами сгорания, воздуха охлаждения и огнеупоров

Деление расчетных зон на  
твердое тело/ газ с продуктами сгорания



Настройка взаимного  
теплообмена  
в математической модели.



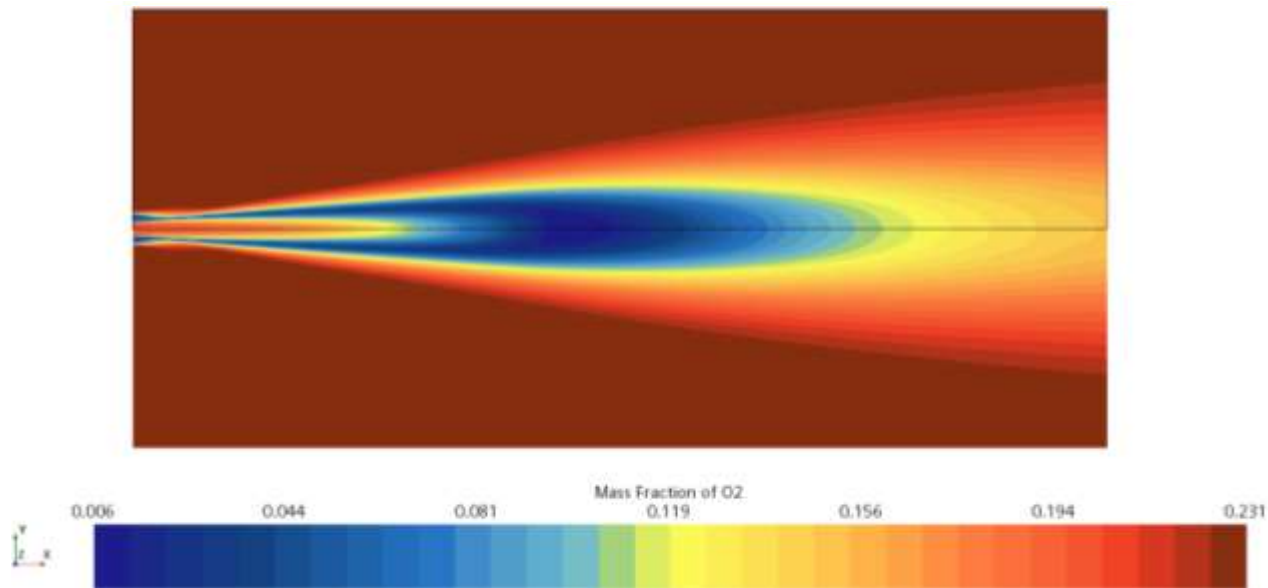
# 3

## результаты расчетов



# тестовая горелка

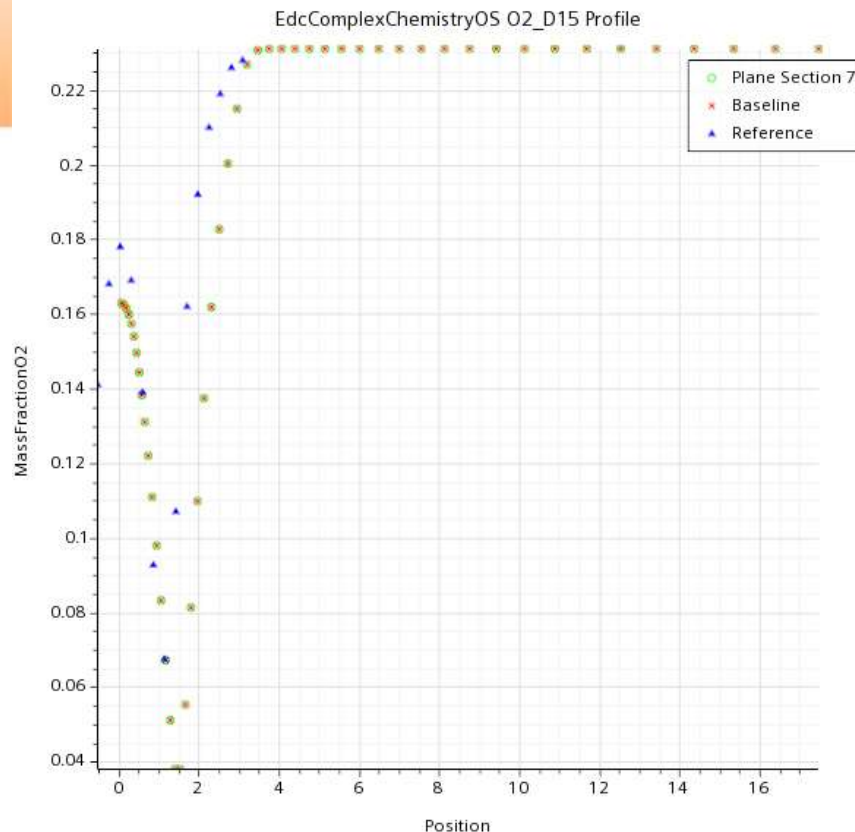
## Расчетные поля





## тестовая горелка

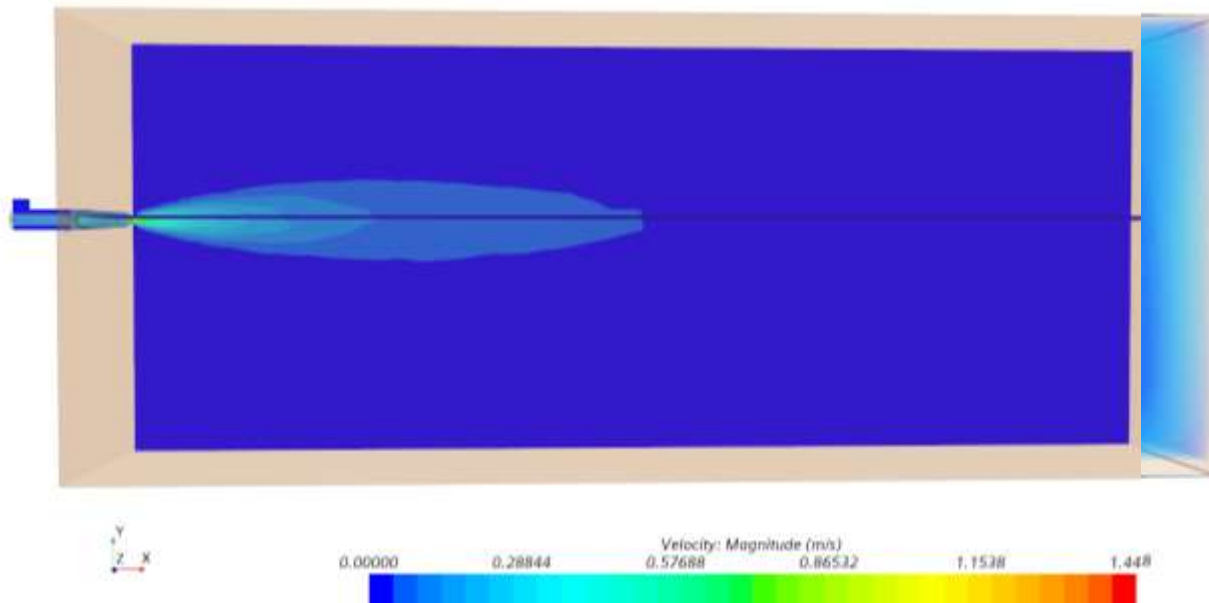
Графики сравнения данных по математической модели и результатами лабораторных испытаний





# горелка 1 типа

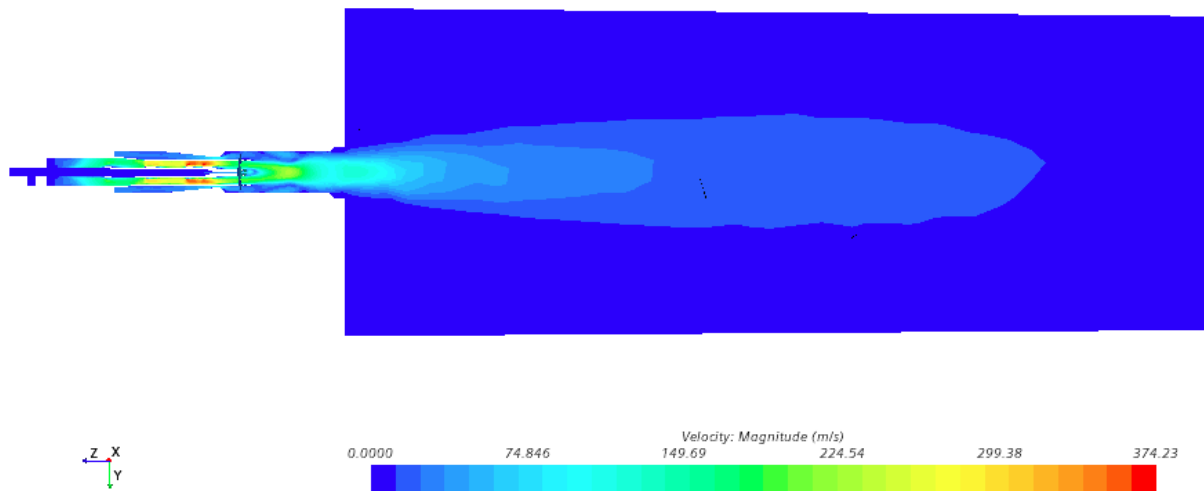
## Расчетные поля





# горелка 2 типа

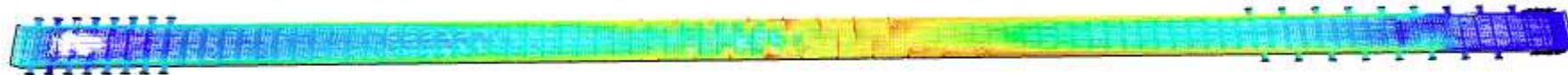
## Расчетные поля





# взаимный нагрев огнеупор/ газы продуктов сгорания

Температурное поле газовой фазы  
в зоне нагрева/обжига/охлаждения



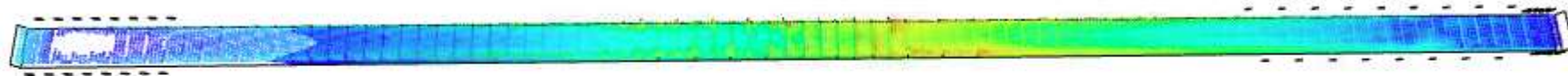
Z-Y  
X





# взаимный нагрев огнеупор/ газы продуктов сгорания

Температурное поле обжигаемого огнеупора  
в зоне нагрева/обжига/охлаждения

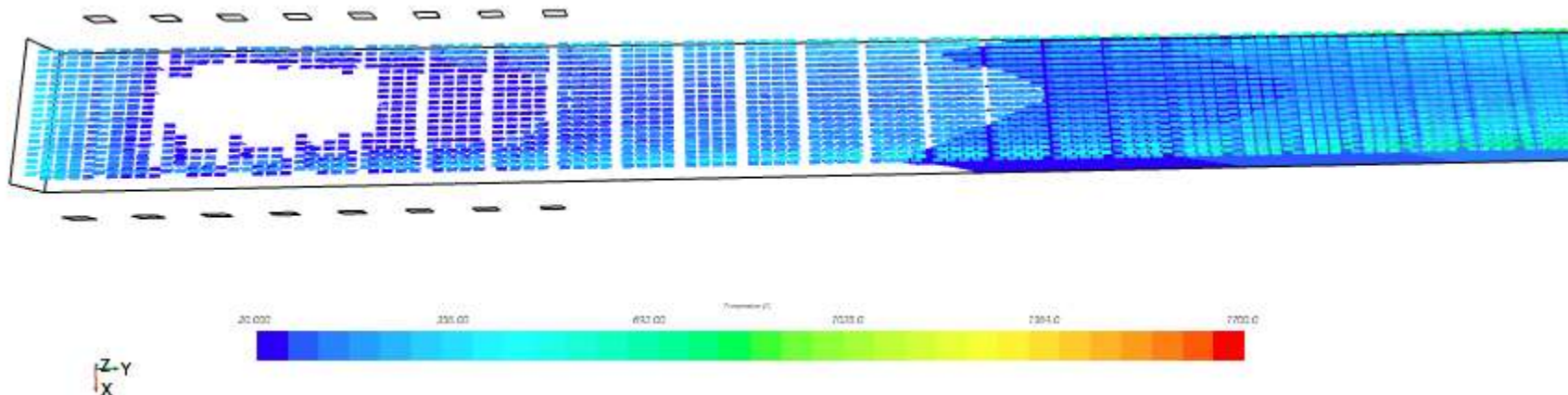






# взаимный нагрев огнеупор/ газы продуктов сгорания

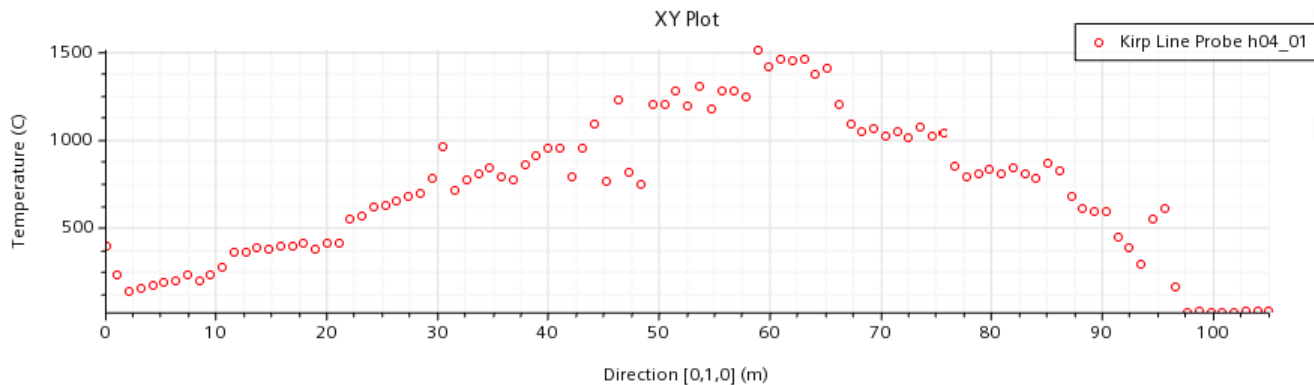
Температурное поле обжигаемого огнеупора  
в зоне нагрева/обжига/охлаждения





# взаимный нагрев огнеупор/ газы продуктов сгорания

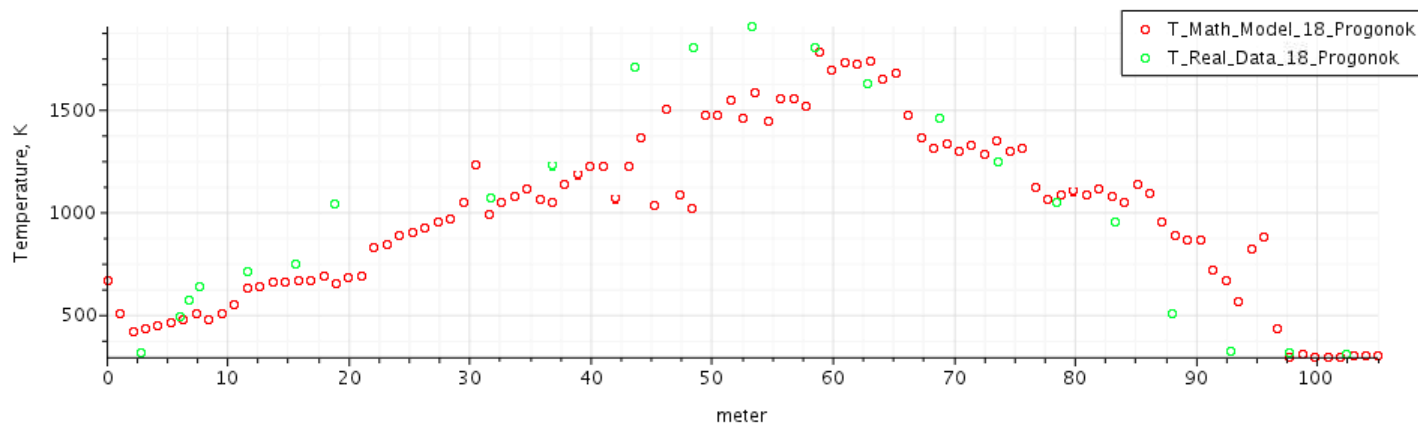
График нагрева огнеупора в печи  
(18 прогонок)





# взаимный нагрев огнеупор/ газы продуктов сгорания

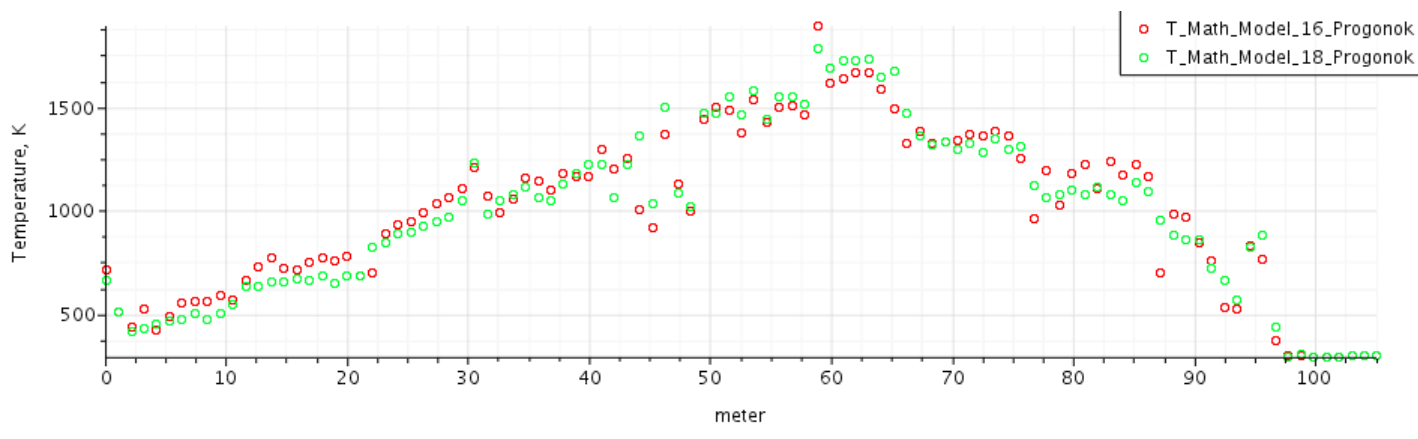
График нагрева огнеупора в печи по мат. модели и измерительным приборам  
(18 прогонок)





# взаимный нагрев огнеупор/ газы продуктов сгорания

График нагрева огнеупора в печи при 16 и 18 прогонках





# 4

## ВЫВОДЫ



# анализ модельных решений

Работа реальных горелок для нагрева огнеупорных изделий.



Моделирование обжига огнеупоров в туннельной печи

## Полезные свойства

- ▶ Вычислительная сложность одного расчета с заданной прогонкой составляет 3 дня
- ▶ С помощью мат. модели горения в горелки можно рассчитать другие процессы металлургии, где нагрев материала происходит природным газом
- ▶ Сопряженный расчет газ /твердое тело позволяет сделать расчет горелки с зонами из чего сделана горелка и проводить анализ материалов (Импорт замещение)



# рекомендации по обжигу огнеупоров в туннельной печи

Реальное фото туннельной печи.



Моделирование обжига огнеупоров в туннельной печи

Знания полученные по математической модели позволяют:

- ▶ задать правильное кол-во прогонок оператору
- ▶ сконфигурировать план обжига изделий с одинаковым (слабо отличающимся) кол-вами прогонок в одной печи
- ▶ оценить влияние геометрии каналов подачи / выхода газа
- ▶ оценить влияние геометрического расположения каналов подачи / выхода газа
- ▶ оценить работу группы и совокупность групп горелок
- ▶ оценить влияние алгоритма кладки огнеупоров на садке вагона и выявить ее плюсы и минусы



# спасибо

Контакты

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)



[Группа Магнезит](#)