

Научный Исследовательский Университет  
«Московский Энергетический Институт»  
Кафедра Атомных Электрических Станций

# **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ● РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОЛИТИЧЕСКОГО ВОДОРОДА В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР**

Воробьева Светлана Юрьевна

26.11.2025

# Актуальность и цели работы



- Опыт эксплуатации реакторных установок типа ВВЭР показал, что в оборудовании первого контура могут образовываться **водородосодержащие парогазовые смеси**.
- **Главным фактором появления водорода** в реакторных установках является **радиолиз** теплоносителя – разложение химических соединений под действием ионизирующего излучения, исходящего из активной зоны реактора.
- При наличии в теплоносителе первого контура **аммиака** идет его разложение с образованием **водорода и азота**. При отсутствии в теплоносителе аммиака идет разложение **воды** с образованием **водорода, кислорода и перекиси водорода**.
- Цель расчетов **реактора** – оценка в стояночном режиме **расхода водорода с поверхности** теплоносителя и определение **времени образования опасной смеси** в парогазовом объеме.
- Задача работы с **нейронной сетью** – создать **метамоделю коэффициента массоотдачи** при меняющихся граничных условиях для встраивания в CFD или одномерный код, что поможет сильно **сократить временные и мощностные затраты** на проведение расчетов, а также проводить уточненные оптимизационные расчеты в рамках обеспечения водородной взрывобезопасности.

# Оценка массового потока через межфазную границу



- **Массовый поток** через межфазную границу:

$$J = \beta(C_s - C_b)$$

где  $\beta$  - **коэффициент массоотдачи**, зависящий от величины турбулентного числа Рейнольдса и числа Шмидта,  $C_s$  – концентрация насыщенного газа на межфазной границе,  $C_b$  – концентрация газа в объеме жидкости.

- Для турбулентного числа Рейнольдса:

- Меньше 500:

$$\beta = 1.6 * u / (Re * Sc)^{0.5}$$

- Больше 500:

$$\beta = 0.343 * u / (Re^{0.25} * Sc^{0.5})$$

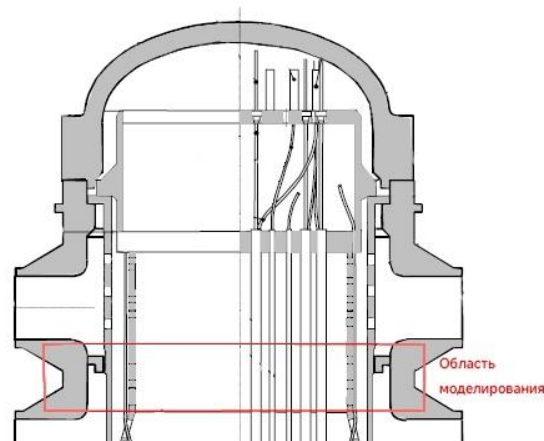
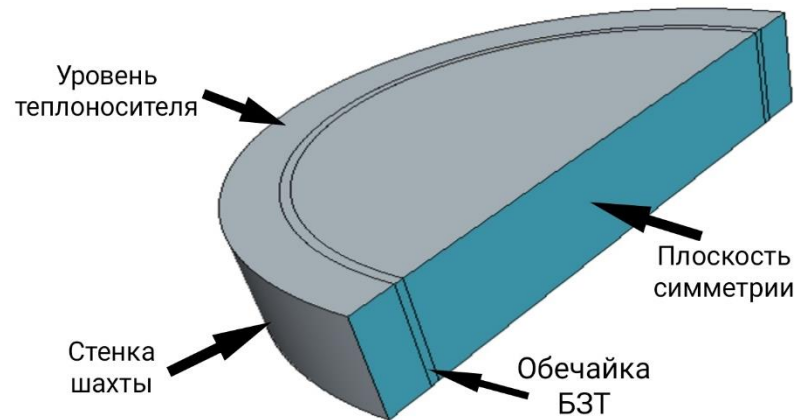
# Оценка массового потока через межфазную границу, реактор

Модель для расчета массового потока представляет собой часть пространства реактора над активной зоной до уровня теплоносителя между входными и выходными патрубками.

Всего было создано три модели:

- Объемом 23604 элементов сетки;
- Объемом 1725376 элементов сетки;
- Объемом 3133416 элементов сетки.

По результатам расчета был получен коэффициент массоотдачи  $\beta$  и пересчитан в удельный расход водорода с поверхности теплоносителя. Результаты были исследованы на точность с помощью индекса GCI.



# Оценка массового потока через межфазную границу, реактор



| Параметр                                      | Модель 1 | Модель 2  | Модель 3 |
|-----------------------------------------------|----------|-----------|----------|
| Количество элементов сетки                    | 23604    | 1725376   | 3133416  |
| Турбулентное число Рейнольдса, Re             | 8438.86  | 359.19    | 51.13    |
| Число Шмидта, Sc                              | 46.37    | 46.37     | 46.37    |
| Пульсационная скорость, $u$ , м/с             | 0.0631   | 0.0168    | 0.006904 |
| Коэффициент массоотдачи, $\beta$ , м/с        | 3.316E-4 | 2.077E-4  | 2.269E-4 |
| Удельный расход, $j$ , кг/(с*м <sup>2</sup> ) | 1.658E-7 | 1.0385E-7 | 1.134E-7 |

# Сеточная сходимость (РБ-166-20)



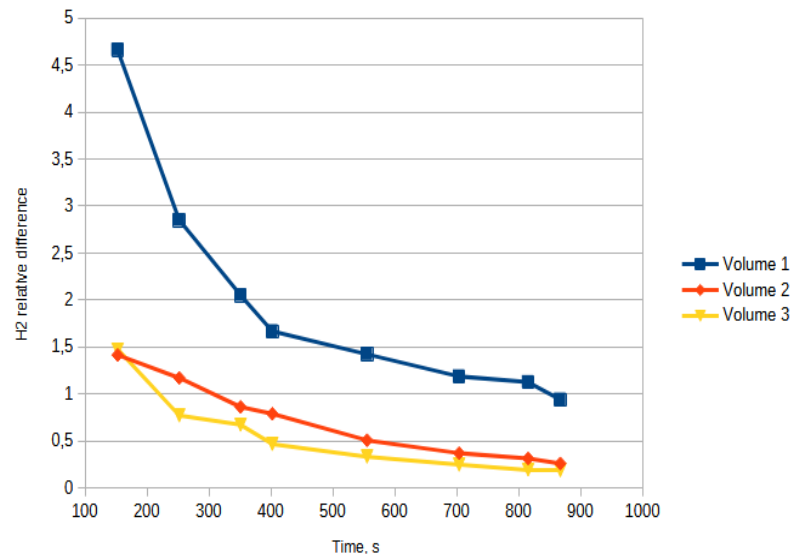
| Параметр                                         | Модель 1              | Модель 2              | Модель 3 |
|--------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| Относительный размер сетки, $h$                  | 0.04561               | 0.01091               | 0.00894  |
| Коэффициент улучшения сетки, $r_{32}$ и $r_{21}$ | 4.181                 | 1.22                  |          |
| Разность решений, $\xi_{32}$ и $\xi_{21}$        | $6.195 \cdot 10^{-8}$ | $-9.58 \cdot 10^{-9}$ |          |
| Коэффициент, $s$                                 | 1                     | -1                    |          |

- Индекс погрешности сходимости:  $p_1 = 9.385$ ,  $p_2 = -48.01$ ,
- Относительная ошибка аппроксимации:  $e_a^{21} = 0.0845$ ,
- Индекс ошибки сетки для отношения моделей 2 и 3 значения  $p_1$ :  $GCI_1 = 1.93\%$ , для значения  $p_2$ :  $GCI_2 = 10.56\%$ .

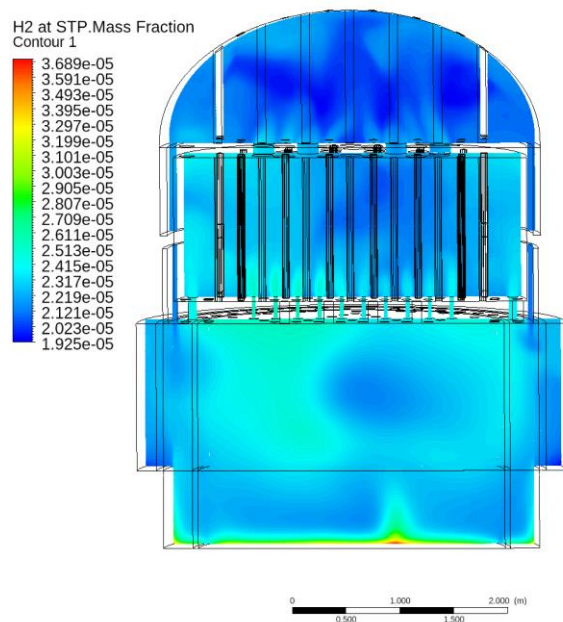
Здесь индекс 1 соответствует наиболее сгущенной сетке, 3 – наиболее разреженной

# Определение времени образования опасной смеси, реактор

- Модель — парогазовая часть объема реактора. Рассматривался стояночный режим. Выходные патрубки принимаются закрытыми, три центральных чехла СУЗ разгерметизированы.
- По результатам расчета выявлены места накопления **водорода** — у поверхности теплоносителя, и **кислорода** — под крышкой реактора.
- Для текущей модели обнаружен преимущественно линейный характер накопления водорода и кислорода в объемах со временем — **время образования опасной смеси составило 33 часа**.
- Также обнаружено, что с течением времени разница в содержании водорода в объемах уменьшается — по прошествии определенного времени **водород может относительно равномерно распределяться по объемам**.



# Определение времени образования опасной смеси, реактор



Распределение содержания водорода по объему

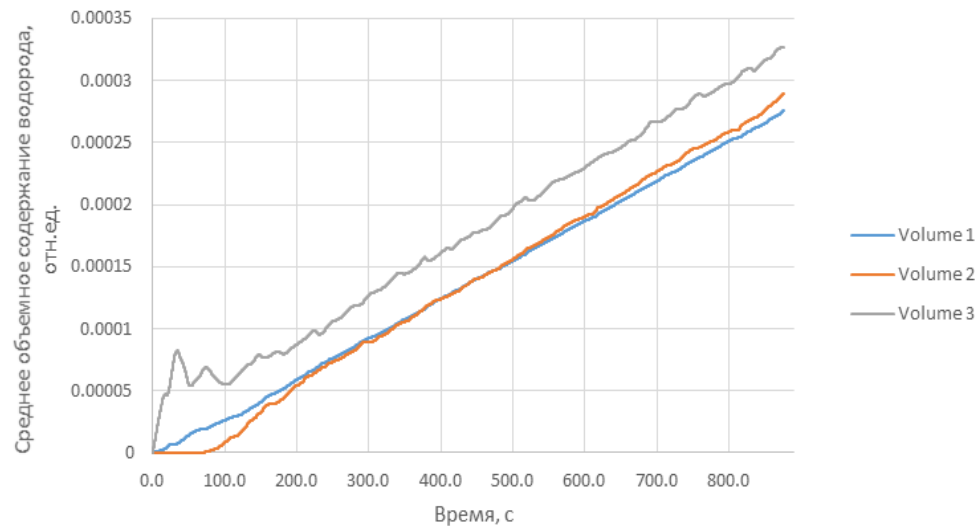
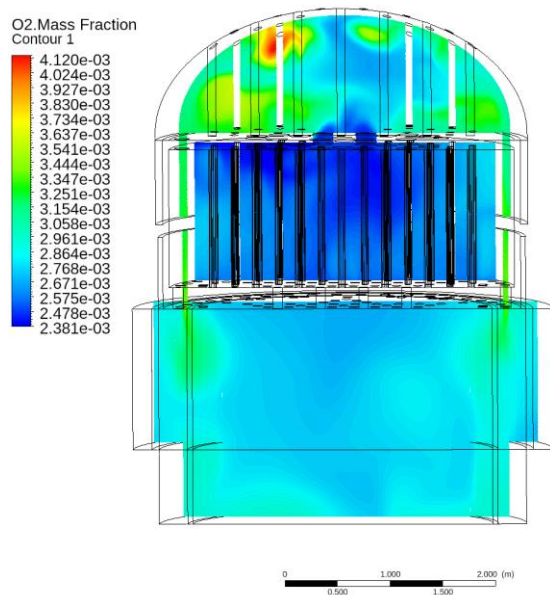


График зависимости мольной доли водорода в объемах от времени расчета

# Определение времени образования опасной смеси, реактор



Распределение содержания кислорода по объему

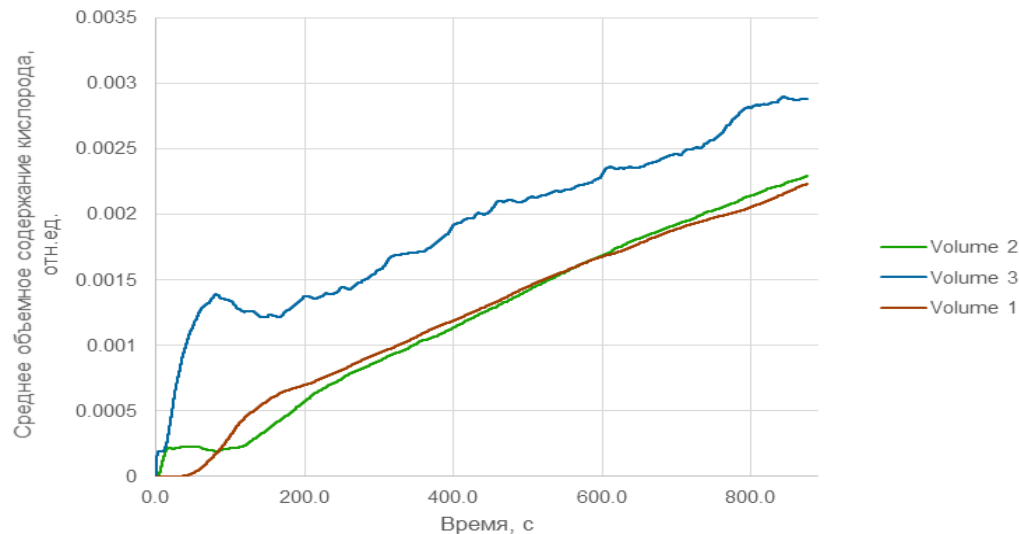


График зависимости мольной доли кислорода в объемах от времени расчета

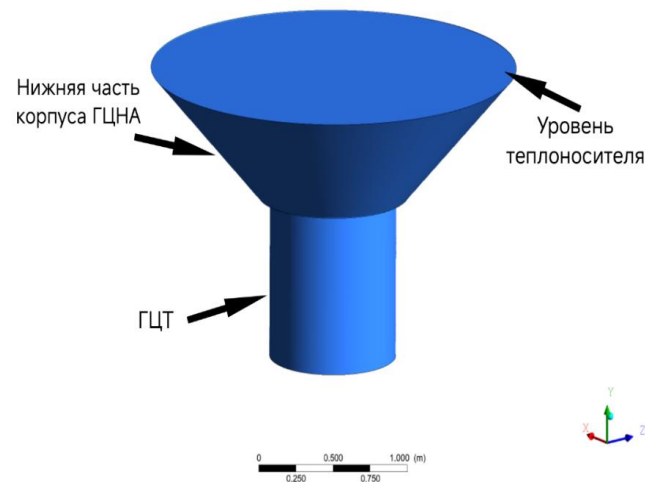
- Основная цель **CFD-расчетов** – оценка в стояночном режиме **поступление водорода** с поверхности теплоносителя и его распределение в объеме. Расход водорода определяется массовым потоком через межфазную поверхность – **коэффициентом массоотдачи**
- **Задача работы с нейронной сетью** – метамодель коэффициента массоотдачи при меняющихся граничных условиях **для встраивания в CFD-код**
- Выбираются **входные и выходные параметры**
- Проводится ряд **расчетов на основе CFD-кодов** – из них формируется множество для обучения и контрольное множество – база данных
- Находятся **параметры метамодели** на основе нейронных сетей:
  - количество скрытых слоев,
  - функции активации скрытого слоя
  - тип потока данных и т.п.

Проводится **обучение нейронной сети**. После этого нейронную сеть можно использовать для расчетов.

# Нейронная сеть и создание базы данных, ГЦНА



- **Входные параметры** – три температуры:  $T_{\text{стенки}}$ ,  $T_{\text{А.З.}}$ ,  $T_{\text{газа}}$  (средняя температура по объему).
- **Выходной параметр** – коэффициент массоотдачи  $\beta$ .
- **На основе CFD-кода** была сформирована **база данных**, включившая в себя 105 расчетов.
- После предварительных расчетов были найдены **оптимальные параметры нейронной сети**:
  - ✓ количество скрытых слоев – 2, порядка 20-17 нейронов на первом, 17-21 – на втором;
  - ✓ функции активации – гиперболический тангенс;
  - ✓ 75% базы данных – на настройку, 25% - на проверку.
- В результате получена **допустимая ошибка 4-5%**.



# Нейронная сеть и создание базы данных, ГЦНА

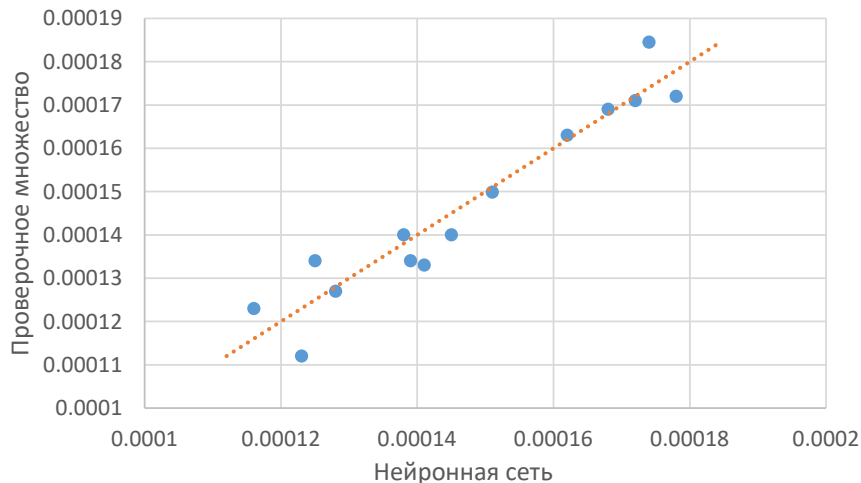
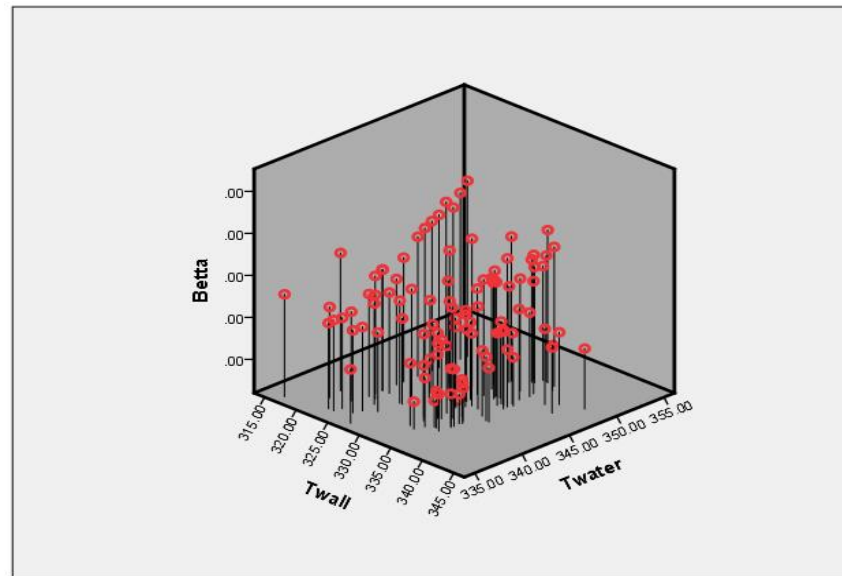


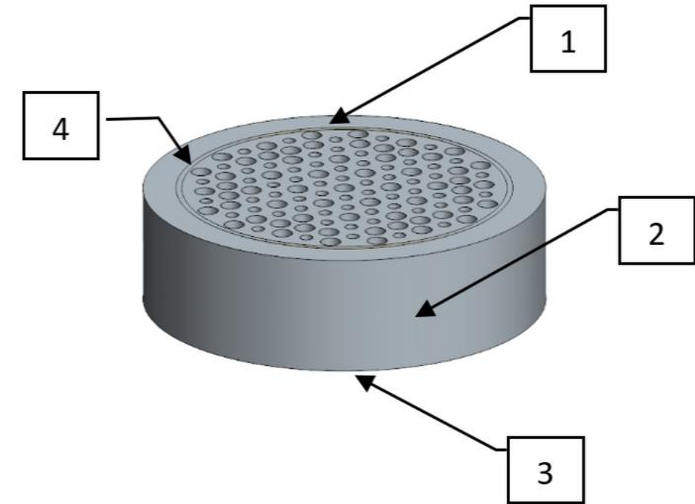
График соответствия коэффициента массоотдачи, полученного с помощью нейронной сети и проверочного множества



Трехмерный график зависимости коэффициента массоотдачи от температур стенки и у поверхности теплоносителя

# Нейронная сеть и создание базы данных, реактор

- **Входные параметры** – три температуры:  $T_{top}$ ,  $T_{wall}$ ,  $T_{core}$ . **Выходной параметр** – коэффициент массоотдачи  $\beta$ .
- **На основе CFD-кода** была сформирована **база данных**, включившая в себя 100 расчетов.
- После предварительных расчетов были найдены **оптимальные параметры нейронной сети**:
  - ✓ количество скрытых слоев – 2, порядка 3 нейронов на первом, 6 – на втором;
  - ✓ функции активации – гиперболический тангенс;
  - ✓ 75% базы данных – на настройку, 25% - на проверку.
- В результате получена **допустимая ошибка 4%**.



# Нейронная сеть и создание базы данных, ГЦНА

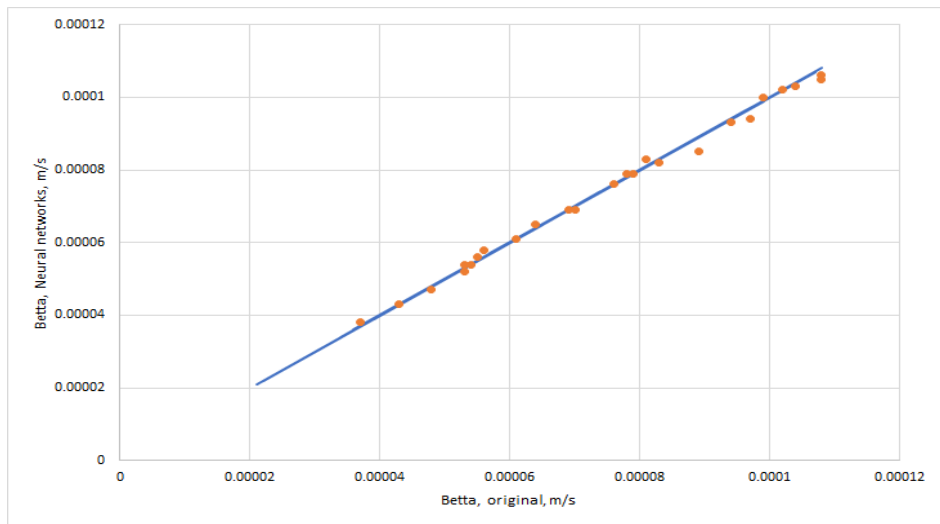
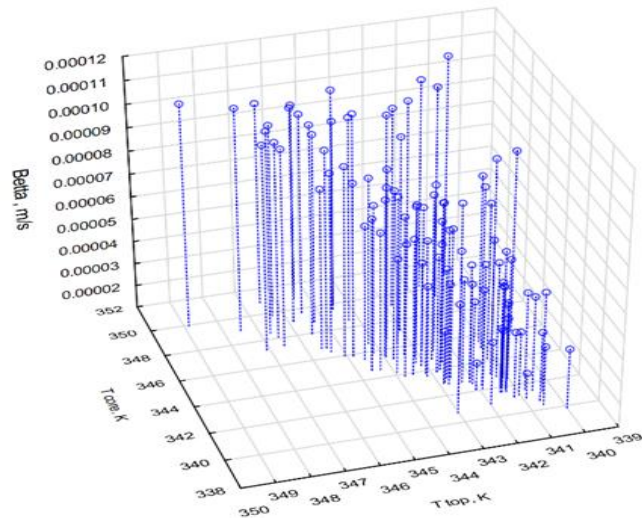


График соответствия коэффициента массоотдачи, полученного с помощью нейронной сети и проверочного множества



Трехмерный график зависимости коэффициента массоотдачи от температур стенки и у поверхности теплоносителя

- Анализируется проблема накопления водорода в оборудовании первого контура и достижения его опасной концентрации.
- Разработан метод исследования проблемы на основе технологии 3D моделирования с использованием CFD-кодов.
- Для модели реактора были получены характеристики транспорта водорода – удельный расход составил  $1.13E-7$  кг/(с\*м<sup>2</sup>). Время образования опасной смеси при текущих условиях составило 33 часа.
- Предложен подход по моделированию процесса массопереноса на основе метамоделей с использованием новой технологии нейросетей.
- С использованием CFD-модели были созданы базы данных для моделей реактора и ГЦНА и получены оптимальные характеристики для обучения нейронной сети.



**Спасибо за внимание!**