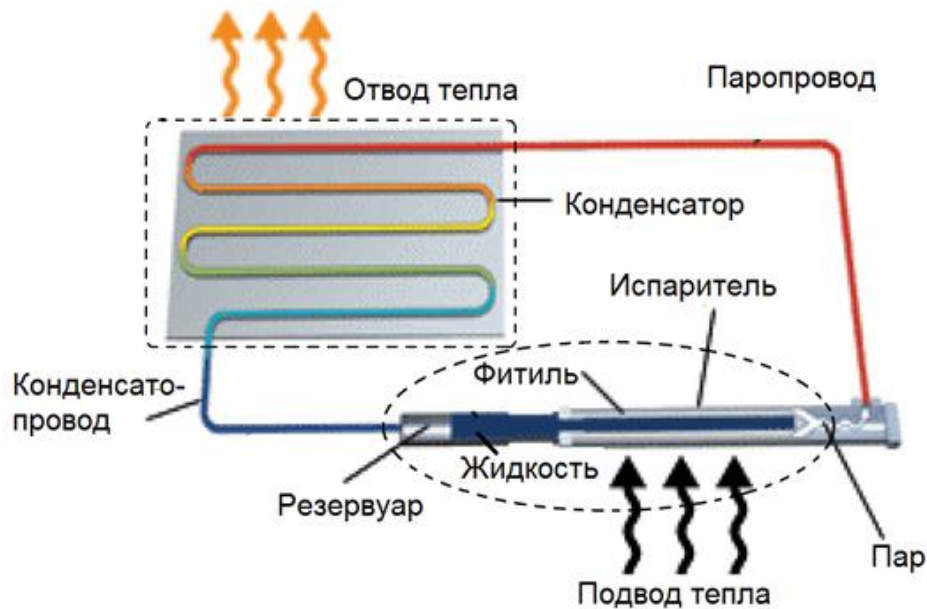


# **Численное моделирование сопряженного тепломассопереноса в испарителе контурной тепловой трубы**

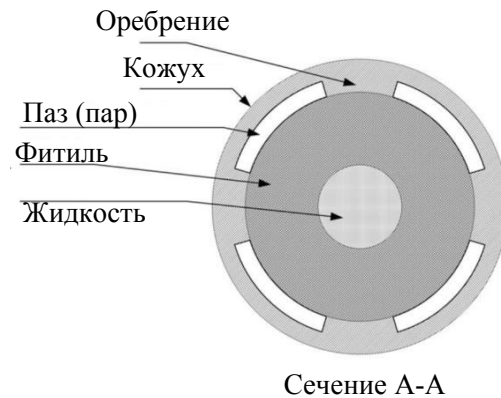
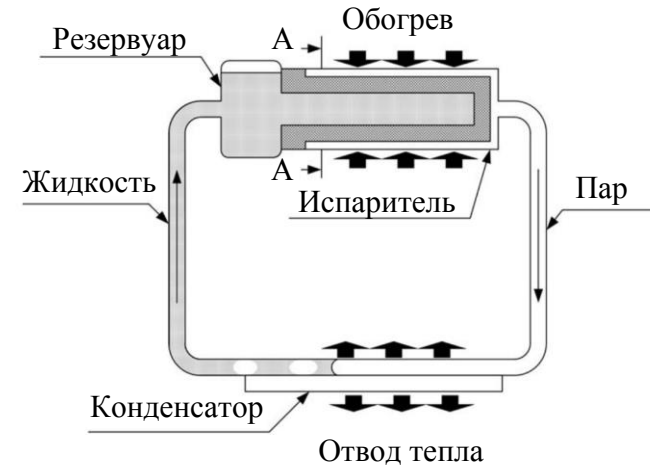
*Д.К.Зайцев, А.А.Пожилов,  
Е.М.Смирнов, А.А.Смирновский*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Кафедра гидроаэродинамики

# Контурные тепловые трубы (КТТ)



Общая схема контурной тепловой трубы



Поперечное сечение испарителя КТТ

# Базовая математическая модель для описания трехмерного тепломассопереноса в испарителе КТТ

## Внутри среды

### Уравнения теплопереноса

**твердое тело**  $\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$

**пар**  $\frac{\partial(\rho c_v T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c_p T \mathbf{V}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$

**пористый фитиль**  $\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_l c_l T \mathbf{V}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$

### Уравнения движения

**баланс массы**  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$

**баланс импульса**  $\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$

**фильтрация в фитиле**  $\mathbf{V} = -\frac{K}{\mu} \nabla p \quad \nabla \cdot \left( \frac{K}{\mu} \nabla p \right) = 0$

## Граница пар-фитиль

$$T_l = T_v = T_{sat}(p_v), \quad T_{sat} = \frac{B}{A - \log p_{sat}} - C \quad g = \frac{1}{L} \left[ \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right)_v - \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right)_l \right] \quad \begin{aligned} (\rho V_n)_v &= (\rho V_n)_l = g \\ (V_t)_v &= 0 \end{aligned}$$

## Граница корпус-пар, корпус-фитиль

$$\left( \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right)_1 = \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right)_2, \quad T_2 = T_1 \quad V = 0$$

# Программный код *FLAG-S*

*(разрабатывается на кафедре гидроаэродинамики СПбПУ с 2003 года)*

- Расчет трехмерных течений несжимаемых жидкостей или газов на основе метода SIMPLEC
- Аппроксимация уравнений по методу конечных объемов
- Схемы второго порядка аппроксимации по пространству и времени
- Набор моделей турбулентности
- Решение СЛАУ с помощью итерационных методов, основанных на подпространствах Крылова
- Неструктурированные сетки с произвольными полиэдральными ячейками
- Параллельные вычисления (декомпозиция расчетной области, MPI)

# Способы построения сеток для грубых уровней

- **Overset Meshes** (Mavriplis, 1992, 1995b; Peraire et al., 1992; Leclercq, 1990; Morano, Dervieux, 1993)

## **Построение набора полностью независимых расчетных сеток**

- Можно следить за качеством каждой отдельной сетки
- Необходимо генерировать несколько сеток для решения одной задачи

- **Nested-Mesh Subdivision** (Parthasarathy, Kallinderis, 1994; Braaten, Connell, 1996)

## **Построение набора мелких сеток на основе начальной грубой сетки**

- Получаем набор вложенных сеток -> простые межсеточные операторы переноса
- Невозможно использовать predetermined мелкую сетку
- К исходной сетке предъявляются противоречивые требования

- **Automated Coarse Mesh Construction**

## **Автоматическое построение грубых сеток на основе исходной мелкой сетки**

- Удаление узлов и ретриангуляция (Guillard, 1993; Chan, Smith 1993; Matheson, Tarjan, 1994)
  - Плохое качество сеток в случае сложной геометрии
- Агломерационный метод - ячейки грубых сеток получают путем объединения исходных ячеек (Lallemant et al., 1992; Smith, 1990; Venkatakrishnan, Mavriplis, 1995)
  - Получаем набор вложенных сеток -> простые межсеточные операторы
  - Грубые уровни содержат полиэдральные ячейки
  - Необходим эффективный способ агломерации ячеек

# Способы агломерации ячеек

- **Локальные**

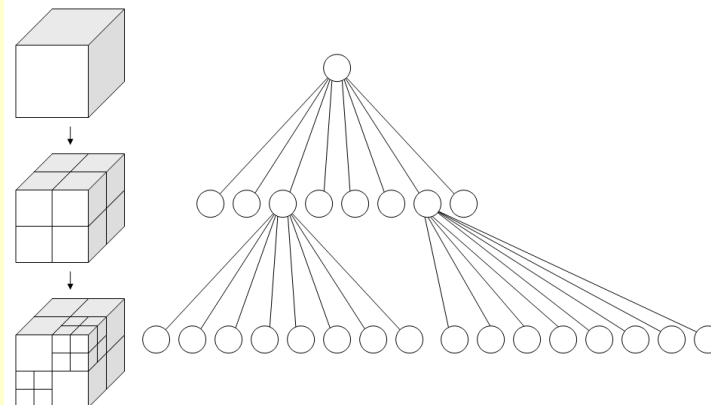
## Агломераты формируются по очереди

- Простейшие алгоритмы используют только связи между элементами сетки
- Более сложные алгоритмы используют дополнительные критерии качества получаемых агломератов (Patel, 2003; Nishikawa et al., 2010)

- **Глобальные**

## Грубая сетка строится сразу вся целиком

- Решение задачи оптимизации определенных критериев, характеризующих качество получаемой сетки
- Построение октодеревя (Marmignon et al., 2012)



# Исходный алгоритм агломерации

(Patel, 2003)

Критерий качества  
агломератов

$$Ar = \frac{Surf^{1/2}}{Vol^{1/3}}$$

## 0. Инициализация очереди

### 1. Построение базиса

Добавляем 3 соседние ячейки.

Если есть варианты:

- Смежные грани
- Больше ячеек из очереди

Если не удалось, то переходим к следующей ячейке из очереди

### 2. Добор ячеек (до 8 шт.)

Добавляем ячейки имеющие двух соседей из агломерата. Если есть варианты:

- Наименьшее значение  $Ar$

### 3. Обновление очереди

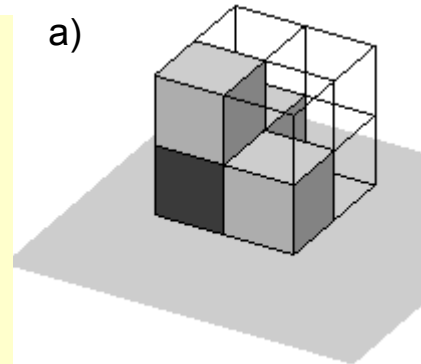
### 4. «Залатка дыр»

Устранение необъединенных ячеек

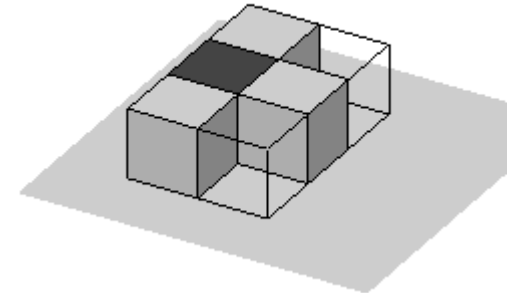
- Наименьшее значение  $Ar$

Темная ячейка – базовая,  
серые ячейки – добавленные на 1 шаге алгоритма,  
прозрачные – добавленные на 2 шаге алгоритма

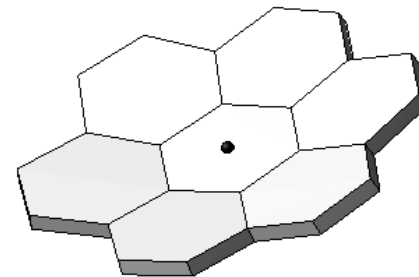
а)



б)



Первый (а) и второй (б) варианты  
выполнения первых двух шагов алгоритма



Пример ячейки, полученной в результате  
использования исходного алгоритма агломерации

Коэффициент сокращения ячеек  $\approx 8$

# Улучшенный алгоритм агломерации



Пример возможной агломерации ячеек  
("кирпичная кладка")

$$D \leq K D_{\min} \quad (*)$$

$D$  – расстояние до рассматриваемой ячейки,

$D_{\min}$  – расстояние до ближайшей ячейки

$K$  – управляющий параметр

Коэффициент сокращения ячеек  $\approx 6$

## 0. Инициализация очереди

### 1. Построение базиса

Добавляем 3 соседние ячейки, имеющие общий узел и удовлетворяющие условию (\*).

Если есть варианты:

- Смежные грани
- Больше ячеек из очереди

Если не удалось и есть ячейки не удовлетворяющие условию (\*), то строим базис с меньшим числом ячеек.

Если не удалось, то переходим к следующей ячейке из очереди.

### 2. Добор ячеек (до 8 шт.)

Добавляем ячейки имеющие двух соседей из агломерата и уменьшающие параметр  $Ar$ .

Если есть варианты:

- Наименьшее значение  $Ar$

### 3. Обновление очереди

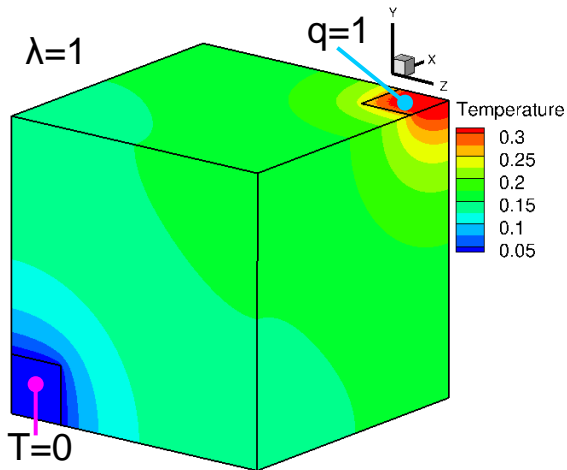
### 4. «Залатка дыр»

Устранение необъединенных ячеек

- Наименьшее значение  $Ar$
- Запрет на образование «ячеек-цепочек»
- Наибольшее относительное уменьшение  $Ar$

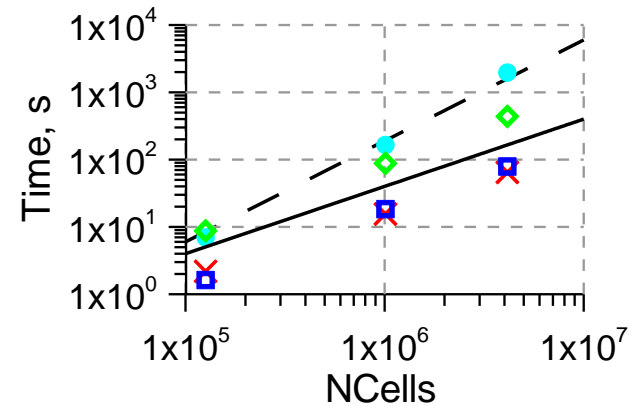


# Результаты тестовых расчетов (1)

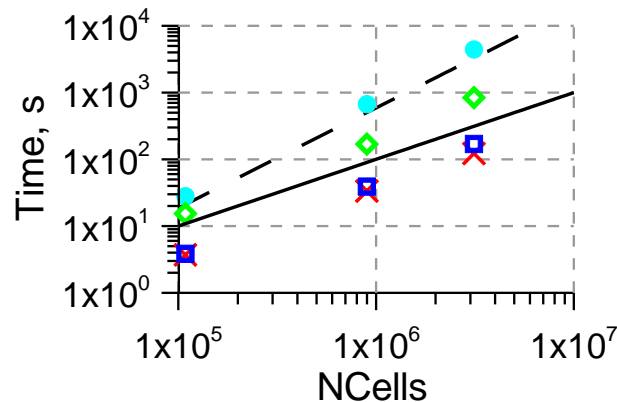


- × Multigrid
- GMRES
- ◇ AMG (HYPRE lib.)
- Fluent 14
- Time~NCells
- - Time~NCells<sup>1.5</sup>

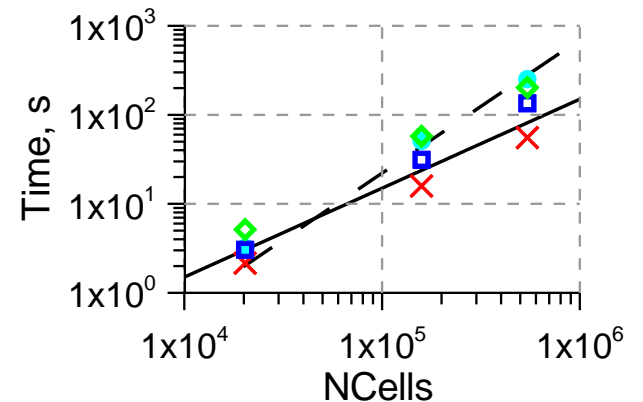
Hexahedral



Tetrahedral



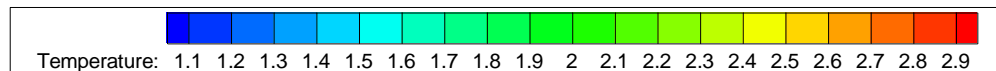
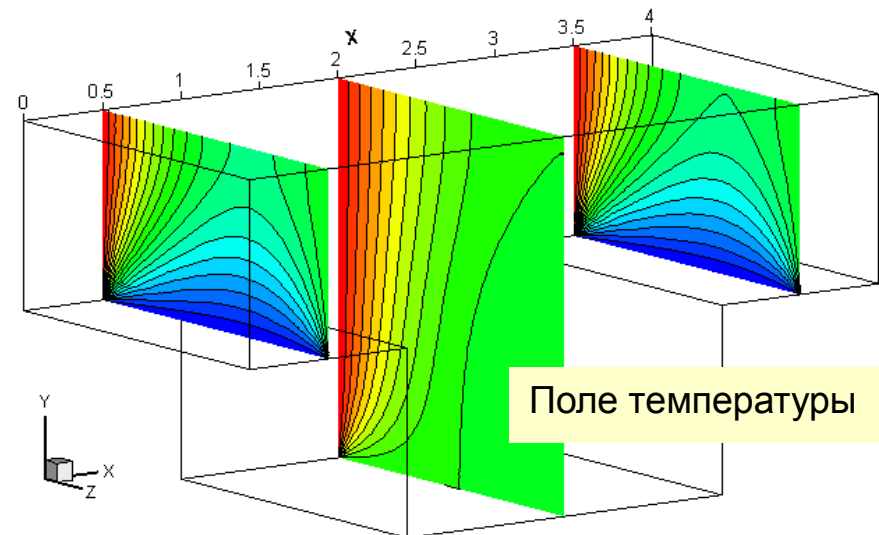
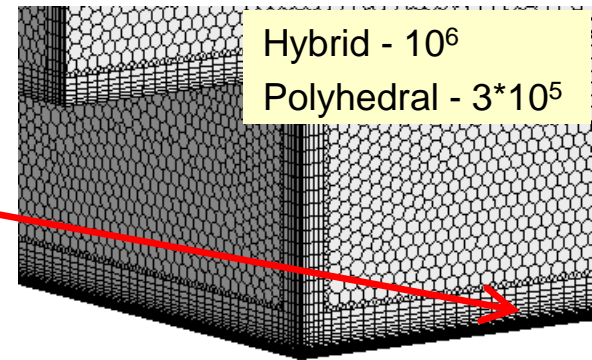
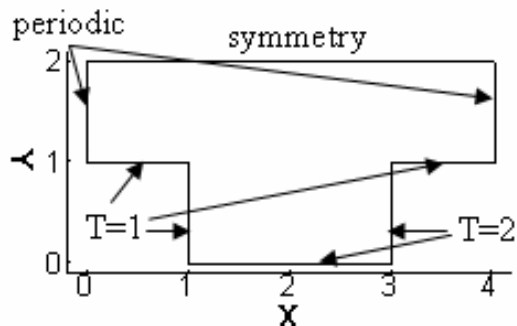
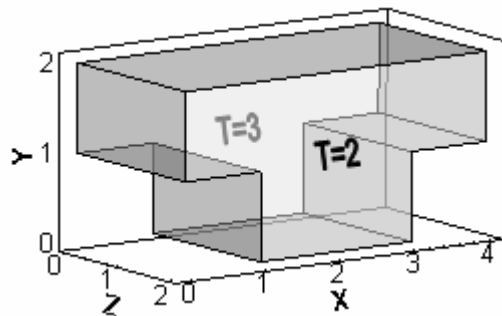
Polyhedral



# Результаты тестовых расчетов (2)

- Разрывные граничные условия
- Удлинение ячеек 5000

Постановка задачи



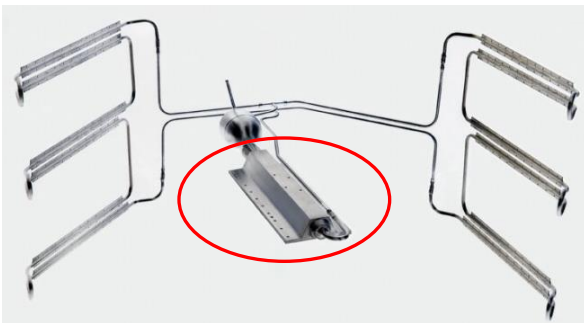
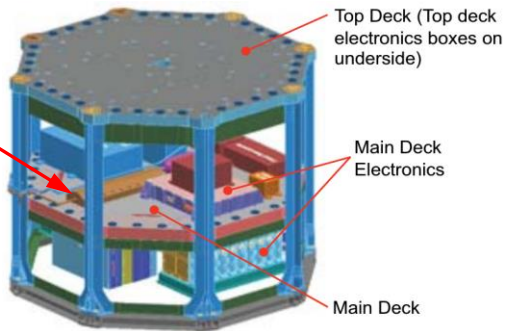
<b>Время расчета, сек.</b>	Multigrid	AMG (HYPRE lib.)
Гибридная сетка	54	238
Полиэдральная сетка	30	100

# Задача тепломассопереноса в испарителе КТТ (1)

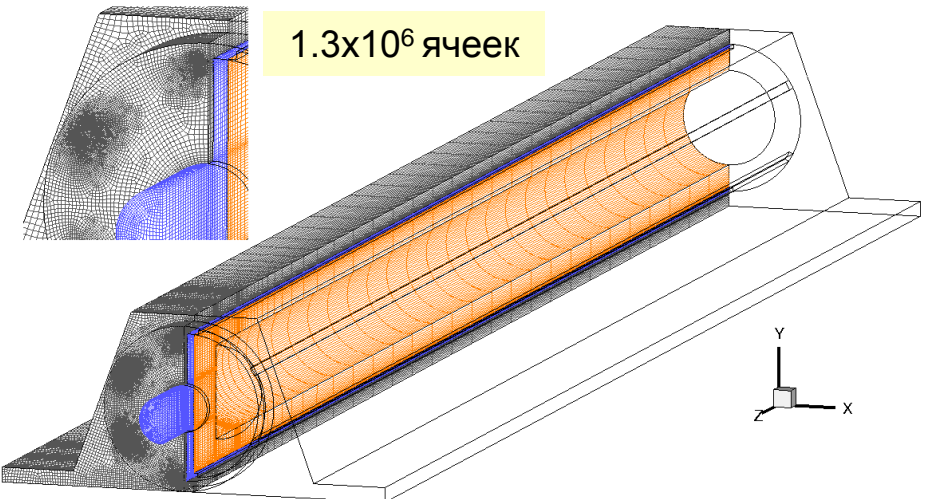
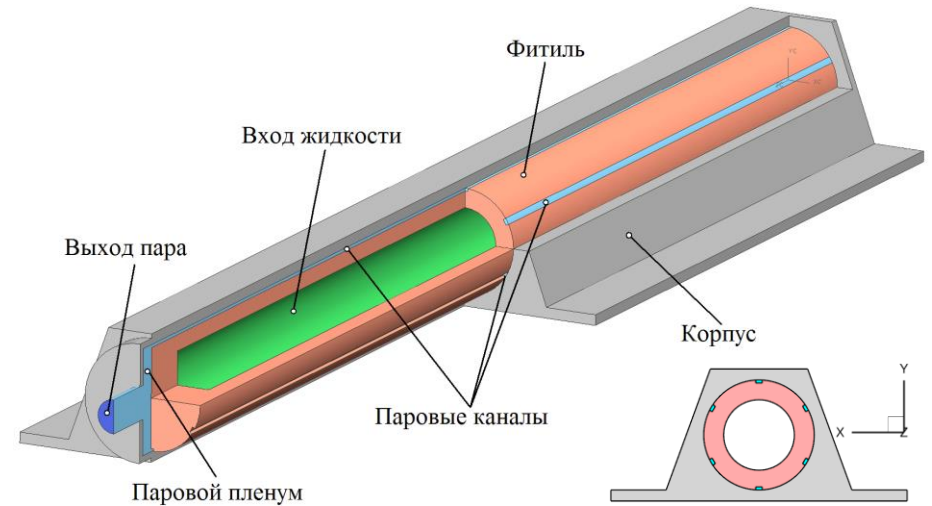
Прототип: СОТР спутника TacSat-4



Испаритель КТТ

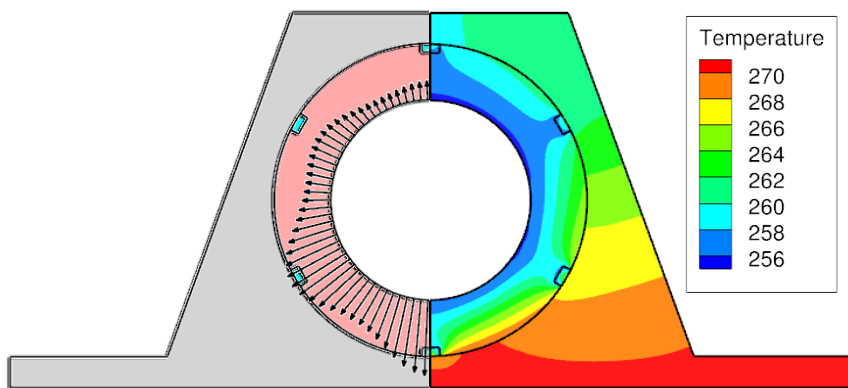


Расчетная область

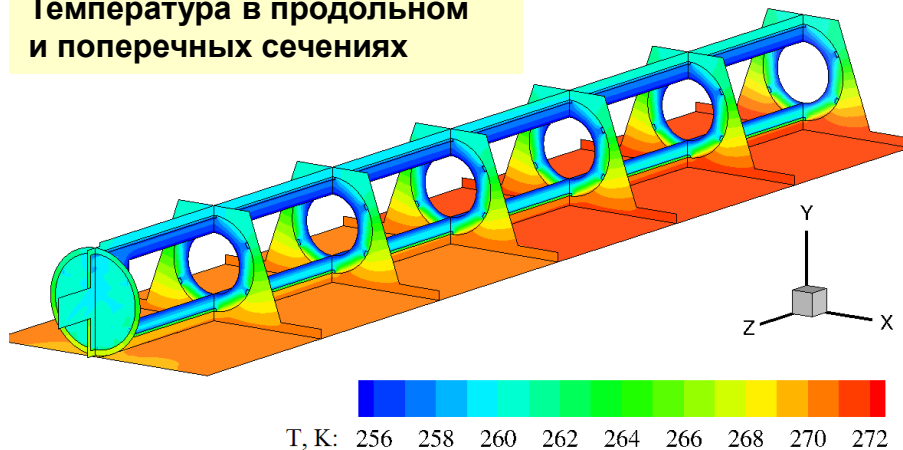


# Задача тепломассопереноса в испарителе КТТ (2)

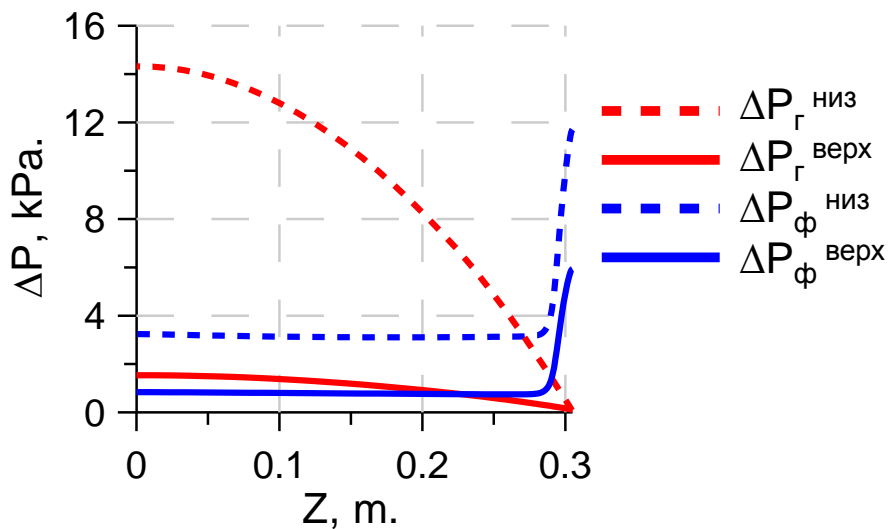
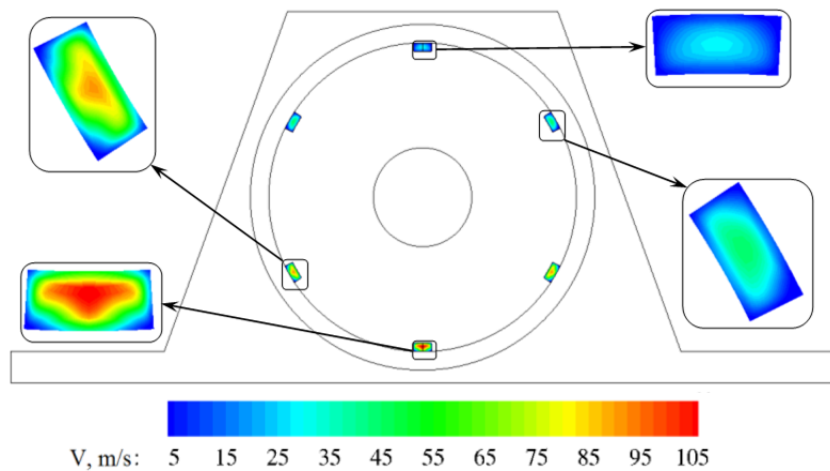
Температура и скорость втекания жидкости в поперечном сечении



Температура в продольном и поперечных сечениях



Скорость пара в паровых каналах



# Заключение

Проведено имитационное численное моделирование течения и сопряженного тепломассопереноса в трехмерной модели испарителя контурной тепловой трубы. Математическая модель базируется на применении трехмерных уравнений Навье-Стокса для паровой фазы и уравнении Пуассона для описания фильтрационного движения рабочей жидкости в пористом фитиле и теплопроводности в твердых элементах.

Показано, что при подводе тепла к испарителю только со стороны полки паровые канавки работают в существенно разных условиях; это может значительно ограничивать максимальную тепловую мощность, отводимую испарителем.

Для повышения эффективности численного алгоритма разработан оригинальный агломерационный многосеточный алгоритм. Продемонстрирована высокая эффективность разработанного метода.

В ходе дальнейших исследований планируется выполнить моделирование усложненной модели испарителя, включающей вторичный фитиль и подводящую байонетную трубку, с учетом прогрева рабочей жидкости при ее движении из компенсационной камеры к внутренней поверхности фитиля.