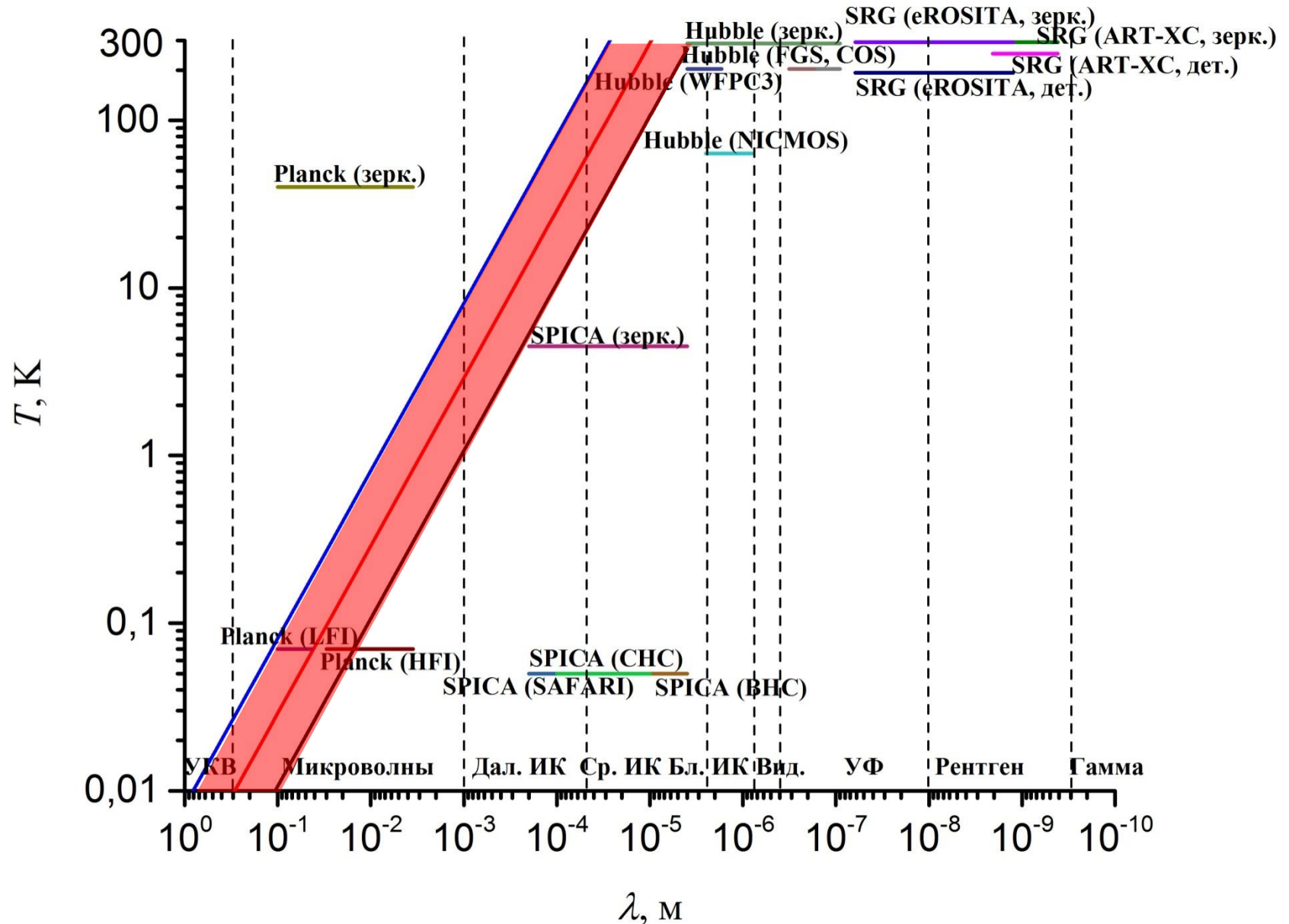


**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ТЕПЛОВОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА, ИМИТИРУЮЩЕГО
УСЛОВИЯ КОСМИЧЕСКОГО
ПРОСТРАНСТВА**

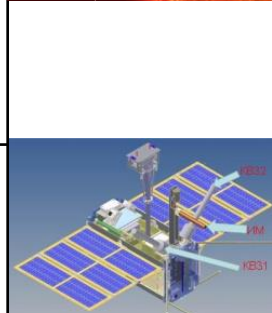
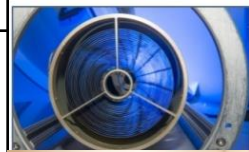
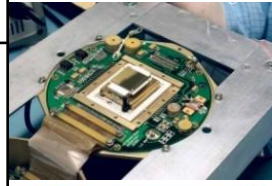
Семена Н.П.

Научная составляющая тепловых задач



Научная составляющая тепловых задач

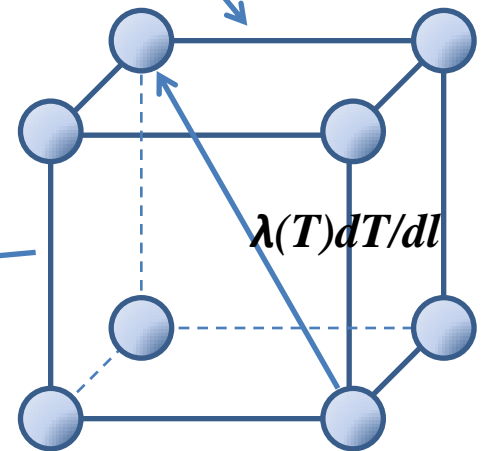
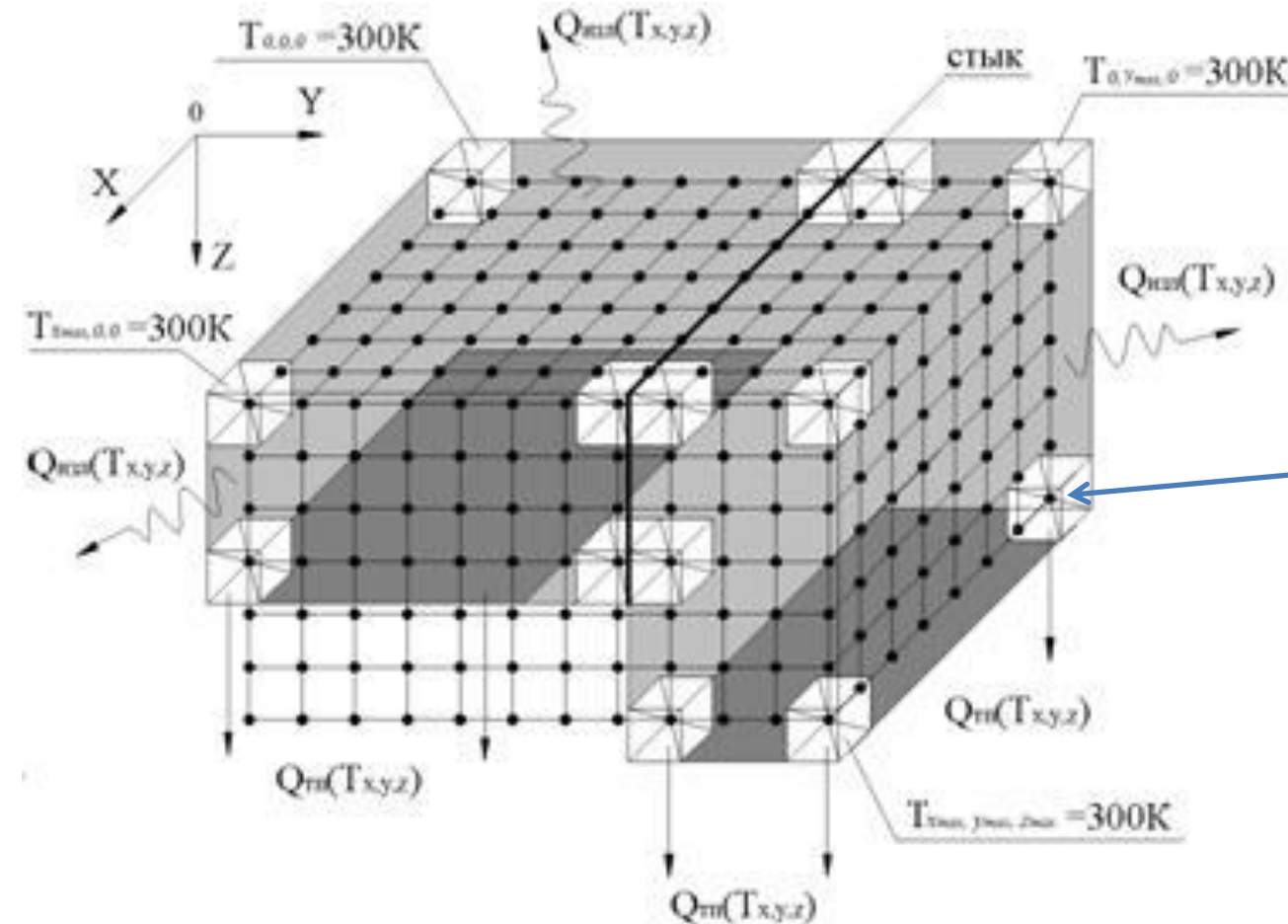
№	Объект	Требуемый температурный режим			Проблемы с обеспечением теплового режима
		Диапазон $t \pm \Delta t$,	Стабильность		
			во времени Δt_τ	в объеме Δt_V	
1	<i>Si</i> детекторы	-80±0,5 °C	±0,5	±0,5	Точное поддержание температуры на низком уровне, высокая стабильность
2	<i>CdTe</i> детекторы	-30±2 °C	±2,0	±2,0	Точное поддержание температуры на низком уровне, высокая стабильность
3	Рентгеновские зеркала	20±2 °C	±2,0	±2,0	Точное поддержание температуры на нормальном уровне, высокая стабильность
4	Бортовые стандарты частоты	20±10 °C	±0,01...1	±0,01...1	Высокая стабильность
5	Термостабилизированная электроника	20±10 °C	±0,1...2	±0,1...2	Высокая стабильность
6	КА типа Солнечный зонд	20±30 °C	±30	±30	Обеспечение нормального теплового режима в условиях интенсивных потоков
7	Микро космические КА	20±30 °C	±30	±30	Обеспечение нормального теплового режима в условиях интенсивных потоков



Конечно элементный метод –

красиво, но не практично для сложного объекта

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q_v$$

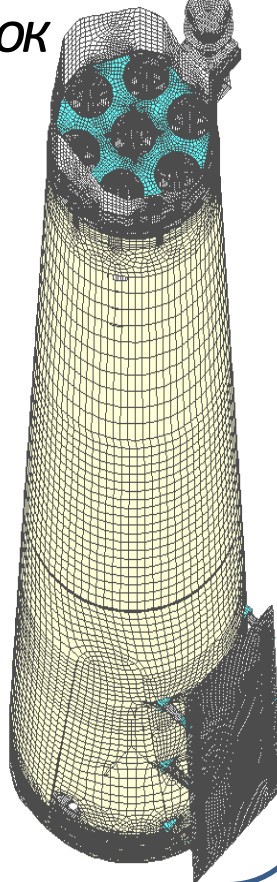


Конечно элементный метод – *красиво, но не практично для сложного объекта*

Исходные
данные

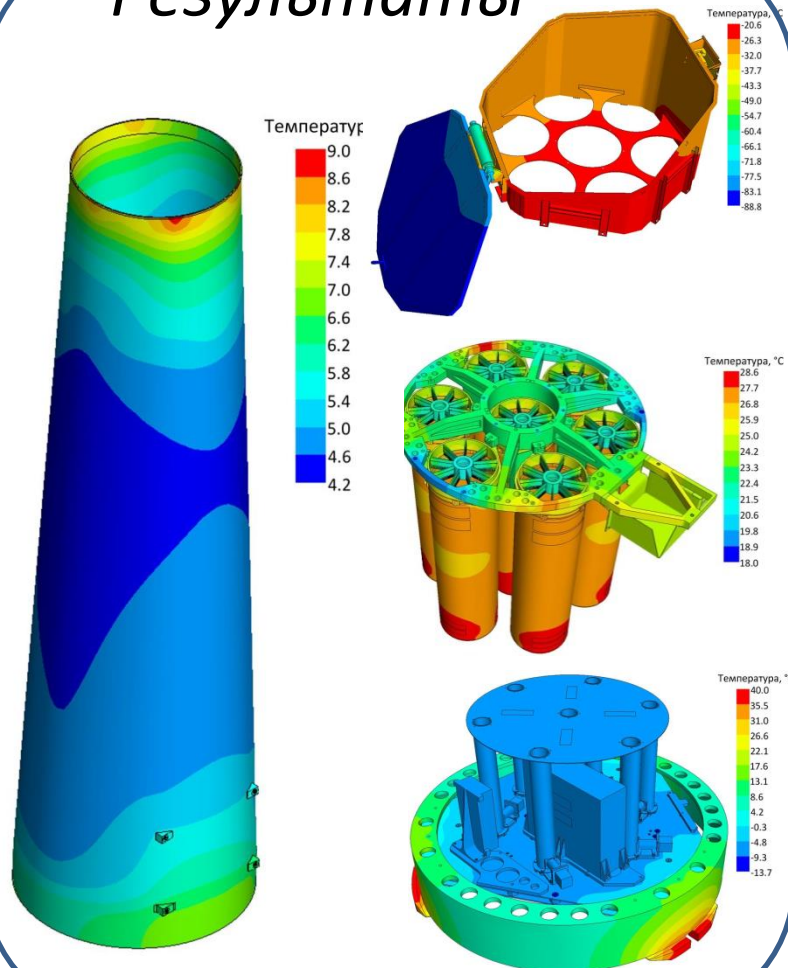


Упрощение
построение сетки
задание тепловых
нагрузок



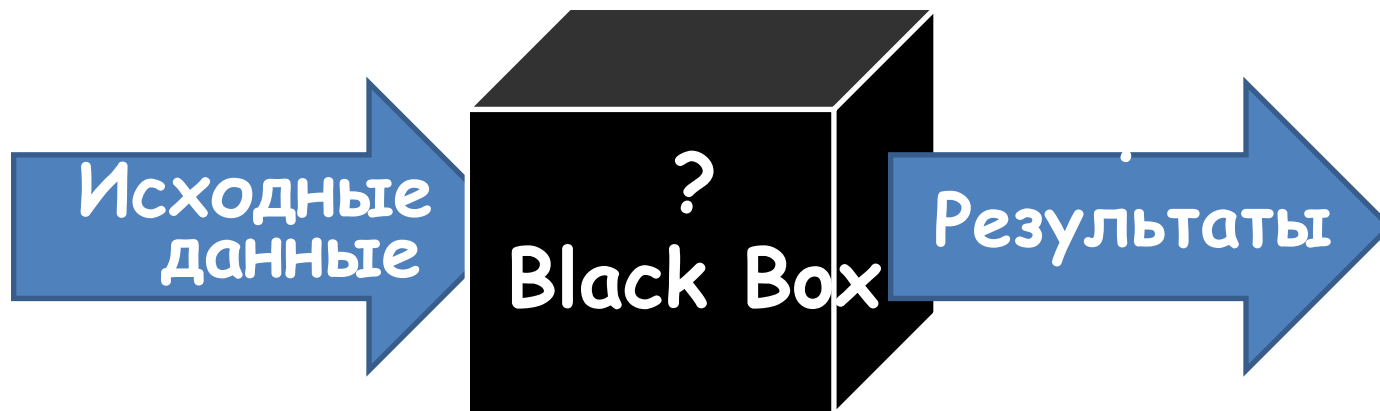
М
о
д
е
л
и
р
о
в
а
н
и
е

Результаты



Конечно элементный метод – *красиво, но не практично для сложного объекта*

- Отсутствие непосредственного доступа к уравнениям математической модели



Конечно элементный метод –

красиво, но не практично для сложного объекта

- Отсутствие непосредственного доступа к уравнениям математической модели
- Высокая вероятность значительной погрешности моделирования из-за значительной накопленной ошибки (**телескоп ART-XC проект СРГ**)
- Невозможность объединения нескольких моделей в единую модель из-за невозможности стыковки их сеток разбиения (**прибор ACS проект ExeMars**)
- Невозможность использования модели для оптимизации параметров системы обеспечения теплового режима из-за значительного времени, необходимого для каждой итерации (**все проекты**)

Конечно элементный метод –

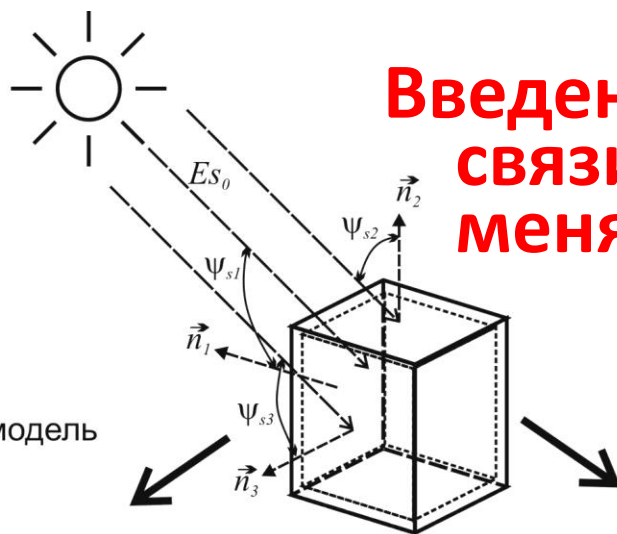
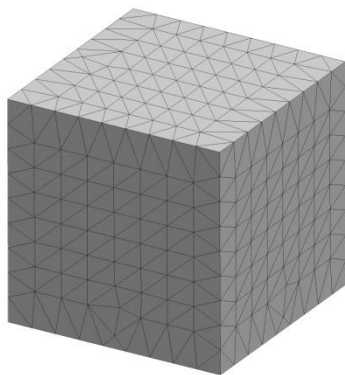
красиво, но не практично для сложного объекта

- **Самое главное** – корректировка модели по результатам эксперимента практически невозможна, а если возможна то только с помощью интуиции

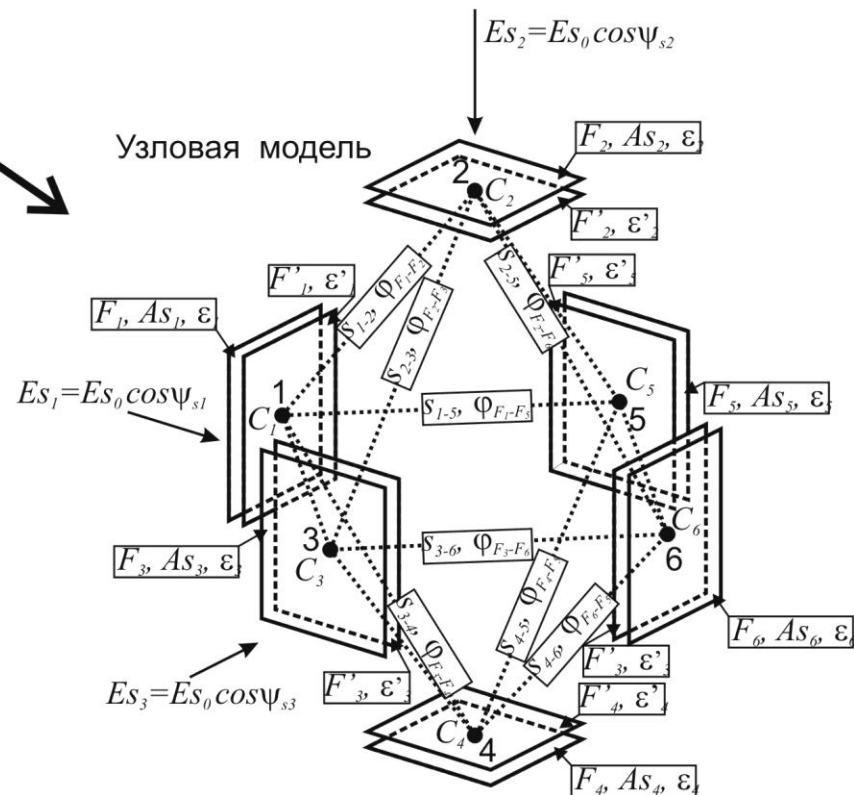
Узловой метод – практично, но не красиво

Введение параметра тепловой связи удаленных элементов меняет все

Конечно-элементная модель



Узловая модель



Узловой метод – *практично, но не красиво*

$$\begin{aligned}
 & \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \cdot C_i = Q_i(\tau) + \\
 & + (As_i \cdot (Es_i(\tau) + Esp_i(\tau) + Esc_i(\tau)) + \varepsilon_i \cdot (Ep_i(\tau) + Ec_i(\tau)) - \\
 & - \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_i^4(\tau)) \cdot F_i - \\
 & - \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n (T_i(\tau) - T_j(\tau)) \cdot s_{i-j} + \\
 & + \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n \sigma \cdot \frac{\varphi_{F'_i - F'_j}}{1 + \varphi_{F'_i - F'_j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F'_j - F'_i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)} \cdot (T_i^4(\tau) - T_j^4(\tau)) \cdot F'_i,
 \end{aligned}$$

Узловой метод – практично, но не красиво

$$\begin{aligned}
 & \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \cdot C_i = Q_i(\tau) + \text{Теплоемкость узла} \\
 & + (As_i \cdot (Es_i(\tau) + Esp_i(\tau) + Esc_i(\tau)) + \varepsilon_i \cdot (Ep_i(\tau) + Ec_i(\tau)) - \\
 & - \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_i^4(\tau)) \cdot F_i - \\
 & - \sum_{j=1}^n (T_i(\tau) - T_j(\tau)) \cdot s_{i-j} + \\
 & (i \neq j) \\
 & + \sum_{j=1}^n \sigma \cdot \frac{\varphi_{F'_i - F'_j}}{1 + \varphi_{F'_i - F'_j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F'_j - F'_i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)} \cdot (T_i^4(\tau) - T_j^4(\tau)) \cdot F'_i, \\
 & (i \neq j)
 \end{aligned}$$

Узловой метод –

практично, но не красиво

$$\begin{aligned}
 \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \cdot C_i = & \underbrace{Q_i(\tau)}_{\text{Тепловыделение узла}} + \\
 & + (As_i \cdot (Es_i(\tau) + Esp_i(\tau) + Esc_i(\tau)) + \varepsilon_i \cdot (Ep_i(\tau) + Ec_i(\tau)) - \\
 & - \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_i^4(\tau)) \cdot F_i - \\
 & - \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n (T_i(\tau) - T_j(\tau)) \cdot s_{i-j} + \\
 & + \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n \sigma \cdot \frac{\varphi_{F'_i - F'_j}}{1 + \varphi_{F'_i - F'_j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F'_j - F'_i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)} \cdot (T_i^4(\tau) - T_j^4(\tau)) \cdot F'_i,
 \end{aligned}$$

Узловой метод – практично, но не красиво

$$\begin{aligned}
 \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \cdot C_i = & Q_i(\tau) + \\
 & + (As_i \cdot (Es_i(\tau) + Esp_i(\tau) + Esc_i(\tau)) + \varepsilon_i \cdot (Ep_i(\tau) + Ec_i(\tau)) - \\
 & - \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_i^4(\tau)) \cdot F_i - \\
 & - \sum_{j=1}^n (T_i(\tau) - T_j(\tau)) \cdot s_{i-j} + \\
 & (i \neq j) \\
 & + \sum_{j=1}^n \sigma \cdot \frac{\varphi_{F'_i - F'_j}}{1 + \varphi_{F'_i - F'_j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F'_j - F'_i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)} \cdot (T_i^4(\tau) - T_j^4(\tau)) \cdot F'_i, \\
 & (i \neq j)
 \end{aligned}$$

Ea_i - поглощенный узлом тепловой поток

Узловой метод – практично, но не красиво

$$\begin{aligned}
 \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \cdot C_i = & Q_i(\tau) + \\
 & + (As_i \cdot (Es_i(\tau) + Esp_i(\tau) + Esc_i(\tau)) + \varepsilon_i \cdot (Ep_i(\tau) + Ec_i(\tau)) - \\
 & - \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_i^4(\tau)) \cdot F_i - \\
 & - \sum_{j=1}^n (T_i(\tau) - T_j(\tau)) \cdot s_{i-j} + \\
 & (i \neq j) \\
 & + \sum_{j=1}^n \sigma \cdot \frac{\varphi_{F'_i - F'_j}}{1 + \varphi_{F'_i - F'_j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F'_j - F'_i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)} \cdot (T_i^4(\tau) - T_j^4(\tau)) \cdot F'_i, \\
 & (i \neq j)
 \end{aligned}$$

Излученный узлом тепловой поток

Узловой метод – практично, но не красиво

$$\begin{aligned}
 \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \cdot C_i = & Q_i(\tau) + \\
 & + (As_i \cdot (Es_i(\tau) + Esp_i(\tau) + Esc_i(\tau)) + \varepsilon_i \cdot (Ep_i(\tau) + Ec_i(\tau)) - \\
 & - \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_i^4(\tau)) \cdot F_i - \\
 & - \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n (T_i(\tau) - T_j(\tau)) \cdot s_{i-j} + \\
 & + \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n \sigma \cdot \frac{\varphi_{F'_i - F'_j}}{1 + \varphi_{F'_i - F'_j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F'_j - F'_i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)} \cdot (T_i^4(\tau) - T_j^4(\tau)) \cdot F'_i,
 \end{aligned}$$

Кондуктивный теплообмен с другими узлами

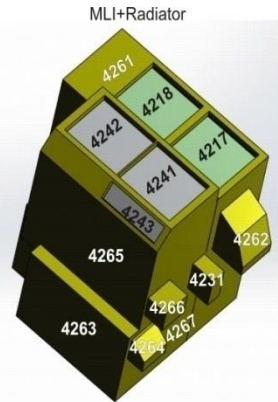
Узловой метод – практично, но не красиво

$$\begin{aligned} \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \cdot C_i = & Q_i(\tau) + \\ & + (As_i \cdot (Es_i(\tau) + Esp_i(\tau) + Esc_i(\tau)) + \varepsilon_i \cdot (Ep_i(\tau) + Ec_i(\tau)) - \\ & - \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_i^4(\tau)) \cdot F_i - \\ & - \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n (T_i(\tau) - T_j(\tau)) \cdot s_{i-j} + \end{aligned}$$

**Радиационный
теплообмен с
другими узлами**

$$+ \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n \sigma \cdot \frac{\varphi_{F'_i - F'_j}}{1 + \varphi_{F'_i - F'_j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F'_j - F'_i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)} \cdot (T_i^4(\tau) - T_j^4(\tau)) \cdot F'_i$$

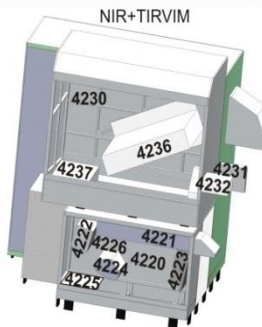
практично, но не красиво



ACS-ExeMars

Node 1	Node 2	Conductive coupling (W/K)
4210	4211	0,5
4210	4212	0,5
...

Node 1	Node 2	Radiative coupling (W/K ⁴)
4210	4230	3,35952E-10
4217	4265	5,93745E-11
...

[illegible][illegible]

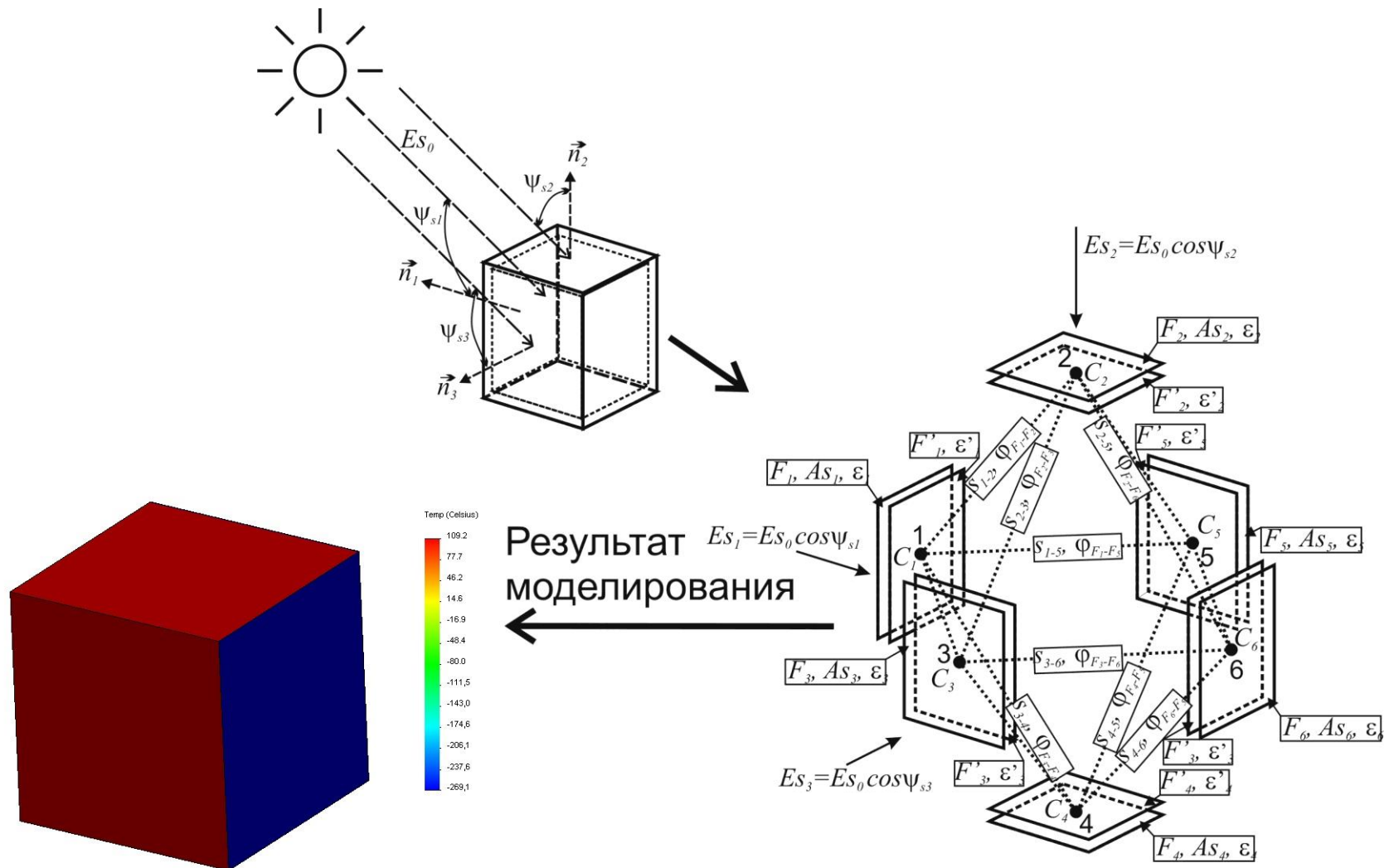
Узловой метод – *практично, но не красиво*

- Имеющийся доступ к уравнениям математической модели позволяет:
- Понизить вероятность погрешности моделирования за счет возможности оценки достоверности промежуточных результатов
- Объединять модели нескольких устройств в единую модель путем модификации и добавления уравнений
- Определять оптимальные параметры системы обеспечения теплового режима используя стандартные математические методы нахождения экстремумов и исследую влияние параметров модели на температуру узлов

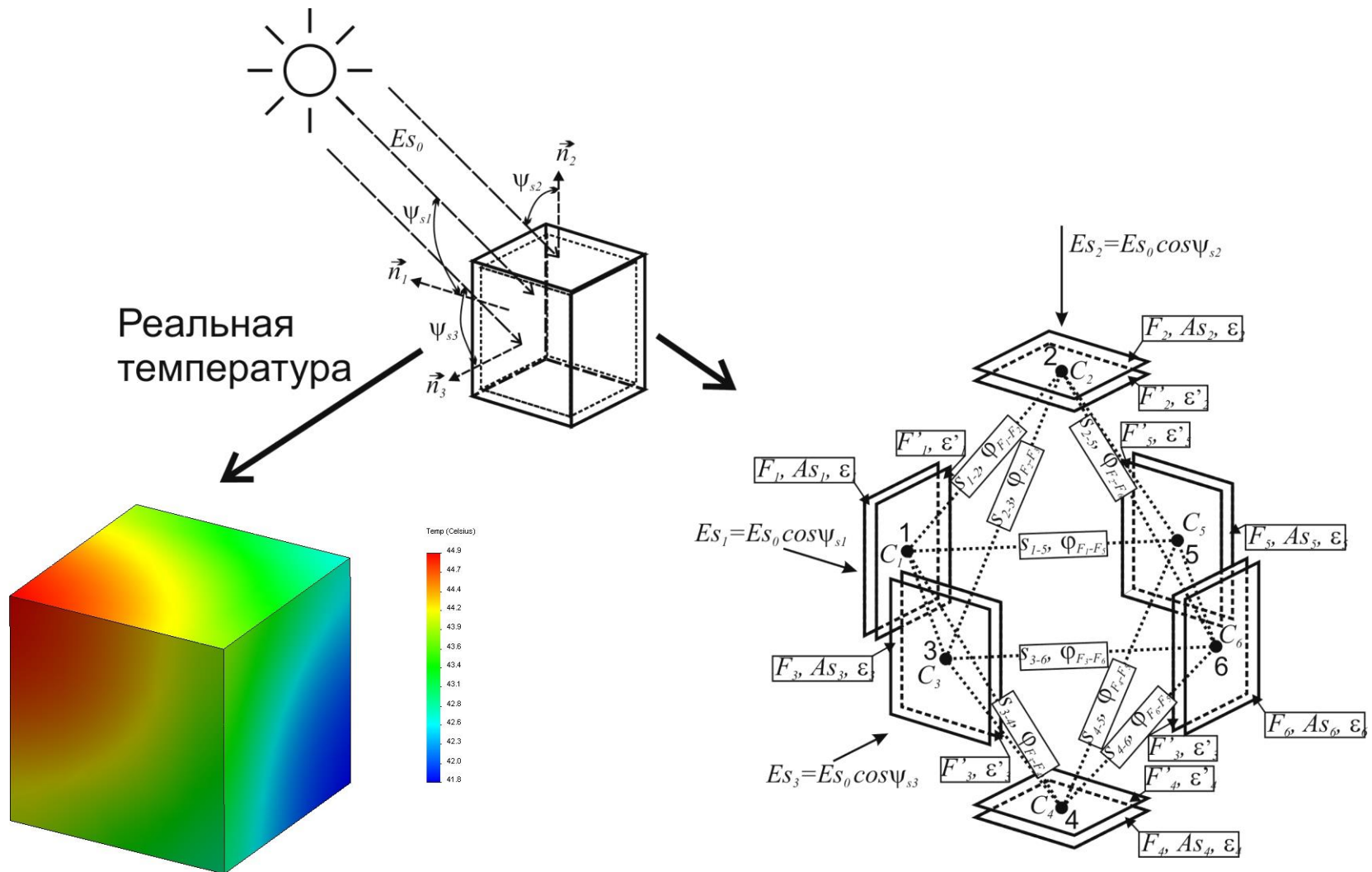
Узловой метод – *практично, но не красиво*

- **Самое главное** – возможность корректировки математической модели по результатам эксперимента с помощью математически формализованных алгоритмов

Узловой метод – ни что не достается даром



Узловой метод – ни что не достается даром



Узловой метод – *концепция эффективных тепловых параметров*

- в каждом узле может быть выделена репрезентативная точка узла, температура которой наиболее важна для разработчика прибора
- можно подобрать такие эффективные параметры узлов тепловой модели, при которых реальная температура репрезентативной точки каждого теплового узла, соответствует результатам теплового моделирования с помощью узловой модели (при этом температуры остальных точек узла могут отклоняться от этих результатов)

Узловой метод – решение аналитическим методом

Исходные данные

Параметры тепловых узлов

Начальные температуры

$T_1(\tau_0) \quad T_2(\tau_0) \quad \dots \quad T_n(\tau_0)$

$C_1 \quad As_1 \quad \varepsilon_1 \quad F_1 \quad \varepsilon'_1 \quad F'_1$

$C_2 \quad As_2 \quad \varepsilon_2 \quad F_2 \quad \varepsilon'_2 \quad F'_2$

...

$C_n \quad As_n \quad \varepsilon_n \quad F_n \quad \varepsilon'_n \quad F'_n$

Тепловыделение

$Q_1(\tau_0) \quad Q_2(\tau_0) \quad \dots \quad Q_n(\tau_0)$

$Q_1(\tau_1) \quad Q_2(\tau_1) \quad \dots \quad Q_n(\tau_1)$

...

$Q_1(\tau_k) \quad Q_2(\tau_k) \quad \dots \quad Q_n(\tau_k)$

Тепловая проводимость

- $s_{1-2} \quad \dots \quad s_{1-n}$

$s_{2-1} \quad - \quad \dots \quad s_{2-n}$

...

$s_{n-1} \quad s_{n-2} \quad \dots \quad -$

Поглощенные потоки

$Ea_1(\tau_0) \quad Ea_2(\tau_0) \quad \dots \quad Ea_n(\tau_0)$

$Ea_1(\tau_1) \quad Ea_2(\tau_1) \quad \dots \quad Ea_n(\tau_1)$

...

$Ea_1(\tau_k) \quad Ea_2(\tau_k) \quad \dots \quad Ea_n(\tau_k)$

Угловые коэф-ты

- $\varphi_{F'1-F'2} \quad \dots \quad \varphi_{F'1-F'n}$

$\varphi_{F'2-F'1} \quad - \quad \dots \quad \varphi_{F'2-F'n}$

...

$\varphi_{F'n-F'1} \quad \varphi_{F'n-F'2} \quad \dots \quad -$

М
о
д
е
л
и
р
о
в
а
н
и
е

Результаты

$T_1(\tau_1) \quad T_2(\tau_1) \quad \dots \quad T_n(\tau_1)$

$T_1(\tau_2) \quad T_2(\tau_2) \quad \dots \quad T_n(\tau_2)$

...

$T_1(\tau_k) \quad T_2(\tau_k) \quad \dots \quad T_n(\tau_k)$

Узловой метод – восстановление эффективных тепловых параметров экспериментально- аналитическим методом

Исходные данные

Начальные температуры

$$T_1(\tau_0) \quad T_2(\tau_0) \quad \dots \quad T_n(\tau_0) \quad |$$

Тепловыделение

$Q_1(\tau_0)$	$Q_2(\tau_0)$	\dots	$Q_n(\tau_0)$	$|$	$T_1(\tau_1)$	$T_2(\tau_1)$	\dots	$T_n(\tau_1)$	$|$
$Q_1(\tau_1)$	$Q_2(\tau_1)$	\dots	$Q_n(\tau_1)$	$|$	$T_1(\tau_2)$	$T_2(\tau_2)$	\dots	$T_n(\tau_2)$	$|$
\dots	\dots	\dots	\dots	$ $	\dots	\dots	\dots	\dots	$ $
$Q_1(\tau_k)$	$Q_2(\tau_k)$	\dots	$Q_n(\tau_k)$	$|$	$T_1(\tau_k)$	$T_2(\tau_k)$	\dots	$T_n(\tau_k)$	$|$

Поглощенные потоки

$Ea_1(\tau_0)$	$Ea_2(\tau_0)$	\dots	$Ea_n(\tau_0)$	$|$
$Ea_1(\tau_1)$	$Ea_2(\tau_1)$	\dots	$Ea_n(\tau_1)$	$|$
\dots	\dots	\dots	\dots	$ $
$Ea_1(\tau_k)$	$Ea_2(\tau_k)$	\dots	$Ea_n(\tau_k)$	$|$

В

О

С

С

т

а

Н

О

В

Л

е

Н

и

е

Результаты

Параметры тепловых узлов

C_1	As_1	ε_1	F_1	ε'_1	F'_1
C_2	As_2	ε_2	F_2	ε'_2	F'_2
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
C_n	As_n	ε_n	F_n	ε'_n	F'_n

Тепловая проводимость

-	s_{1-2}	\dots	s_{1-n}
s_{2-1}	-	\dots	s_{2-n}
\dots	\dots	\dots	\dots
s_{n-1}	s_{n-2}	\dots	-

Угловые коэф-ты

-	$\varphi_{F'1-F'2}$	\dots	$\varphi_{F'1-F'n}$
$\varphi_{F'2-F'1}$	-	\dots	$\varphi_{F'2-F'n}$
\dots	\dots	\dots	\dots
$\varphi_{F'n-F'1}$	$\varphi_{F'n-F'2}$	\dots	-

Экспериментально-аналитический метод – *модификация матмодели*

Эффективные площади внешнего теплообмена:

$$Fe_i = \varepsilon_i \cdot F_i$$

Эффективные радиационные связи:

$$Ie_i = \frac{\varphi_{F'_i - F'_j} \cdot F'_i}{1 + \varphi_{F'_i - F'_j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F'_j - F'_i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)}$$

Экспериментально-аналитический метод – модификация матмодели

Теплоемкость узла

Эффективная площадь
внешнего теплообмена

$$\begin{aligned} & \frac{dT_i(\tau + \Delta\tau_i)}{d\tau} \cdot C_i + (\sigma \cdot T_i^4(\tau + \Delta\tau_i) - E_i(\tau)) \cdot Fe_i + \\ & + \sum_{j=1}^n (T_i(\tau + \Delta\tau_i) - T_j(\tau + \Delta\tau_j)) \cdot s_{i-j} + \\ & (i \neq j) \quad \text{Эффективная кондуктивная связь узлов} \\ & + \sum_{j=1}^n \sigma \cdot (T_i^4(\tau + \Delta\tau_i) - T_j^4(\tau + \Delta\tau_j)) \cdot Ie_{i-j} \approx Q_i(\tau), \\ & (i \neq j) \quad \text{Эффективная радиационная связь узлов} \end{aligned}$$

Экспериментально-аналитический метод – *учет использования экспериментальных данных*

Задержка реакции термодатчиков

$$\begin{aligned} & \frac{dT_i(\tau + \Delta\tau_i)}{d\tau} \cdot C_i + (\sigma \cdot T_i^4(\tau + \Delta\tau_i) - E_i(\tau)) \cdot Fe_i + \\ & + \sum_{j=1}^n (T_i(\tau + \Delta\tau_i) - T_j(\tau + \Delta\tau_j)) \cdot s_{i-j} + \\ & + \sum_{j=1}^n \sigma \cdot (T_i^4(\tau + \Delta\tau_i) - T_j^4(\tau + \Delta\tau_j)) \cdot Ie_{i-j} \approx Q_i(\tau), \end{aligned}$$

Приблизительное равенство

Экспериментально-аналитический метод – планирование эксперимента

Строка теплоемкостей

$C_1 \quad C_2 \quad \dots \quad C_n$

n

Строка эффективных площадей внешнего теплообмена

$Fe_1 \quad Fe_2 \quad \dots \quad Fe_n$

n

Матрица эффективных кондуктивных связей

$\begin{array}{cccc} - & s_{1-2} & \dots & s_{1-n} \\ s_{2-1} & - & \dots & s_{n-n} \\ & & \dots & \\ s_{n-1} & s_{n-2} & \dots & - \end{array}$

$\frac{n^2+n}{2}$

Матрица эффективных радиационных связей

$\begin{array}{cccc} - & Ie_{1-2} & \dots & Ie_{1-n} \\ Ie_{2-1} & - & \dots & Ie_{n-n} \\ & & \dots & \\ Ie_{n-1} & Ie_{n-2} & \dots & - \end{array}$

$\frac{n^2+n}{2}$

Количество искоемых параметров:

n^2+n

Требуемое количество тепловых состояний при эксперименте:

$n+1$

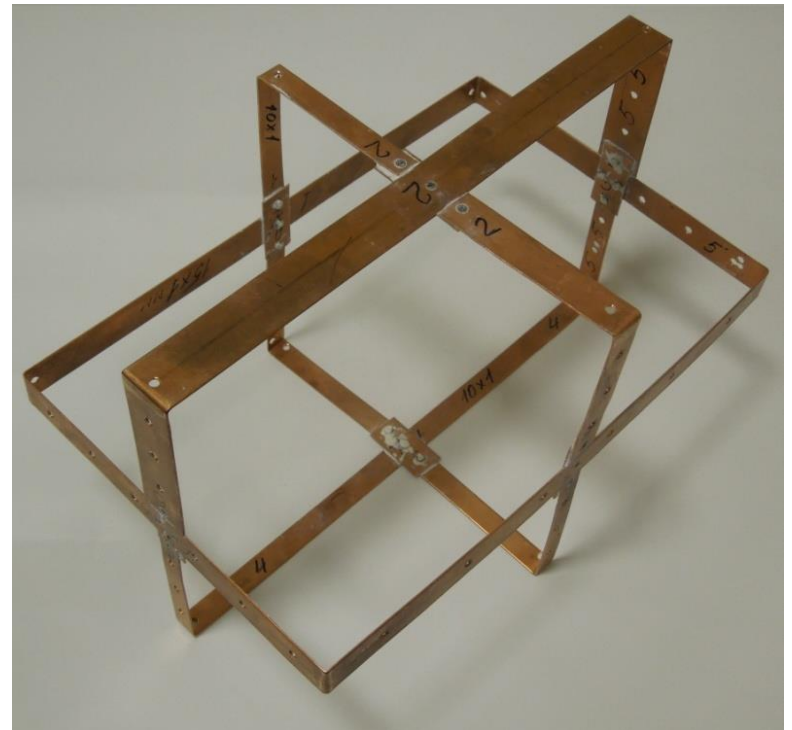
Экспериментально-аналитический метод – восстановление эффективных тепловых параметров методом наименьших квадратов

λm	1	2	...	n	$n+1$	$n+2$	...	$2n$	$2n+1$	...	$\frac{n^2+3n}{2}$	$\frac{(n^2+3n)/2}{+1}$	...	n^2+n	
	$x:$														
	C_1	C_2	...	C_n	Fe_1	Fe_2	...	Fe_n	s_{1-2}	...	s_{n-1-n}	Ie_{1-2}	...	Ie_{n-1-n}	
	$A:$														$b:$
1	$\frac{dT_1(\tau_1)}{d\tau}$	0	...	0	$T_1^4(\tau_1)-Ep_1(\tau_1)$	0	...	0	$T_1(\tau_1)-T_2(\tau_1)$	...	0	$\sigma(T_1^4(\tau_1)-T_2^4(\tau_1))$	...	0	$Q_1(\tau_1)$
2	0	$\frac{dT_2(\tau_1)}{d\tau}$	...	0	0	$T_2^4(\tau_1)-Ep_2(\tau_1)$	...	0	0	...	0	0	...	0	$Q_2(\tau_1)$
...															
n^2+n	0	0	...	$\frac{dT_n(\tau_k)}{d\tau}$	0	0	...	$T_n^4(\tau_k)-Ep_n(\tau_k)$	0	...	$T_n(\tau_k)-T_{n-1}(\tau_k)$	0	...	$\sigma(T_n^4(\tau_k)-T_{n-1}^4(\tau_k))$	$Q_n(\tau_k)$

$$A \cdot x = b \Rightarrow (A \cdot x - b)^T \cdot (A \cdot x - b) \rightarrow \min \Rightarrow A^T \cdot A \cdot x = A^T \cdot b \Rightarrow x = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot b$$

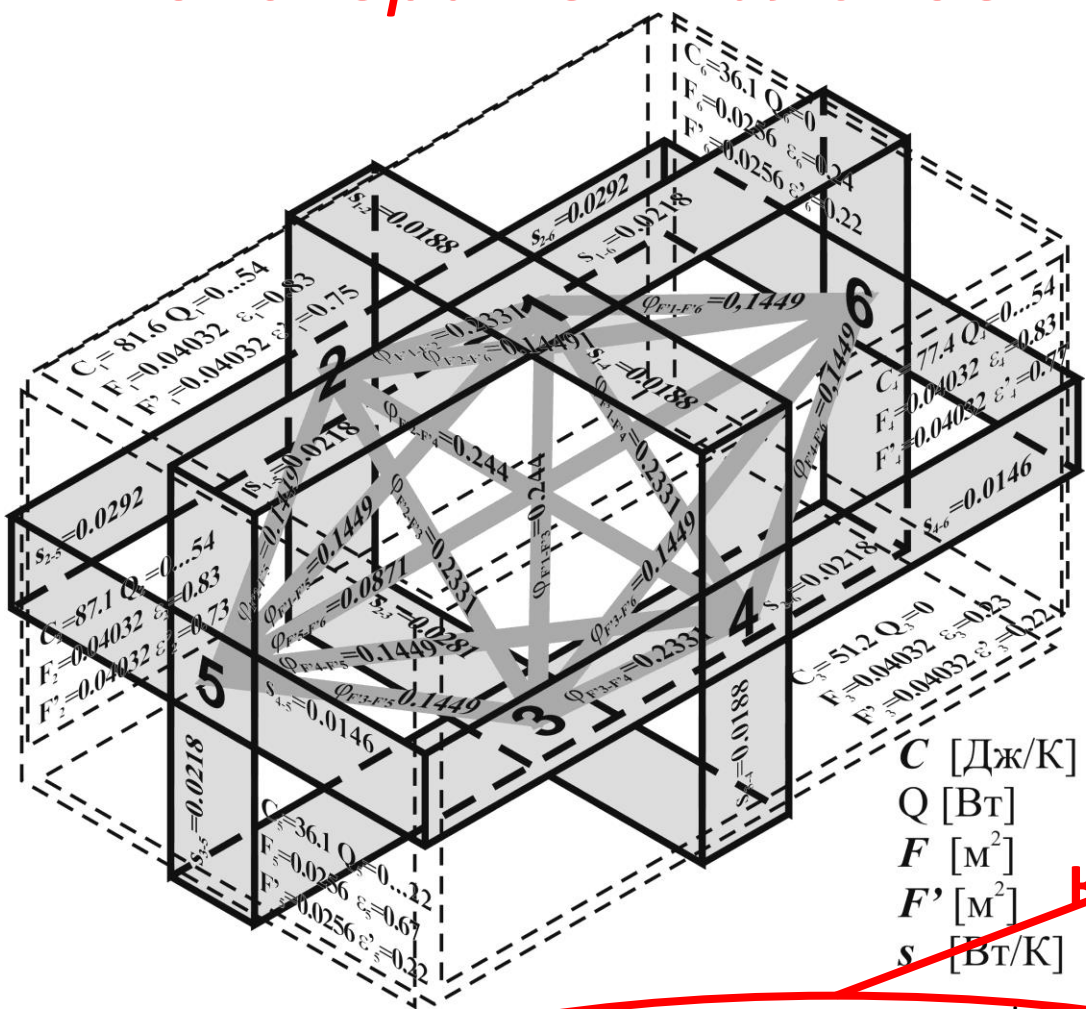
Экспериментально-аналитический метод – *экспериментальное подтверждение*

Тестовый тепловой макет (ТТМ) Кондуктивные связи ТТМ



Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение

Физические параметры



C_1	As_1	ε_1	F_1	ε'_1	F'_1
C_2	As_2	ε_2	F_2	ε'_2	F'_2
...					
C_n	As_n	ε_n	F_n	ε'_n	F'_n

-	$\varphi_{F'1-F'2}$	...	$\varphi_{F'1-F'n}$
$\varphi_{F'2-F'1}$	-	...	$\varphi_{F'2-F'n}$
		...	
$\varphi_{F'n-F'1}$	$\varphi_{F'n-F'2}$	...	-

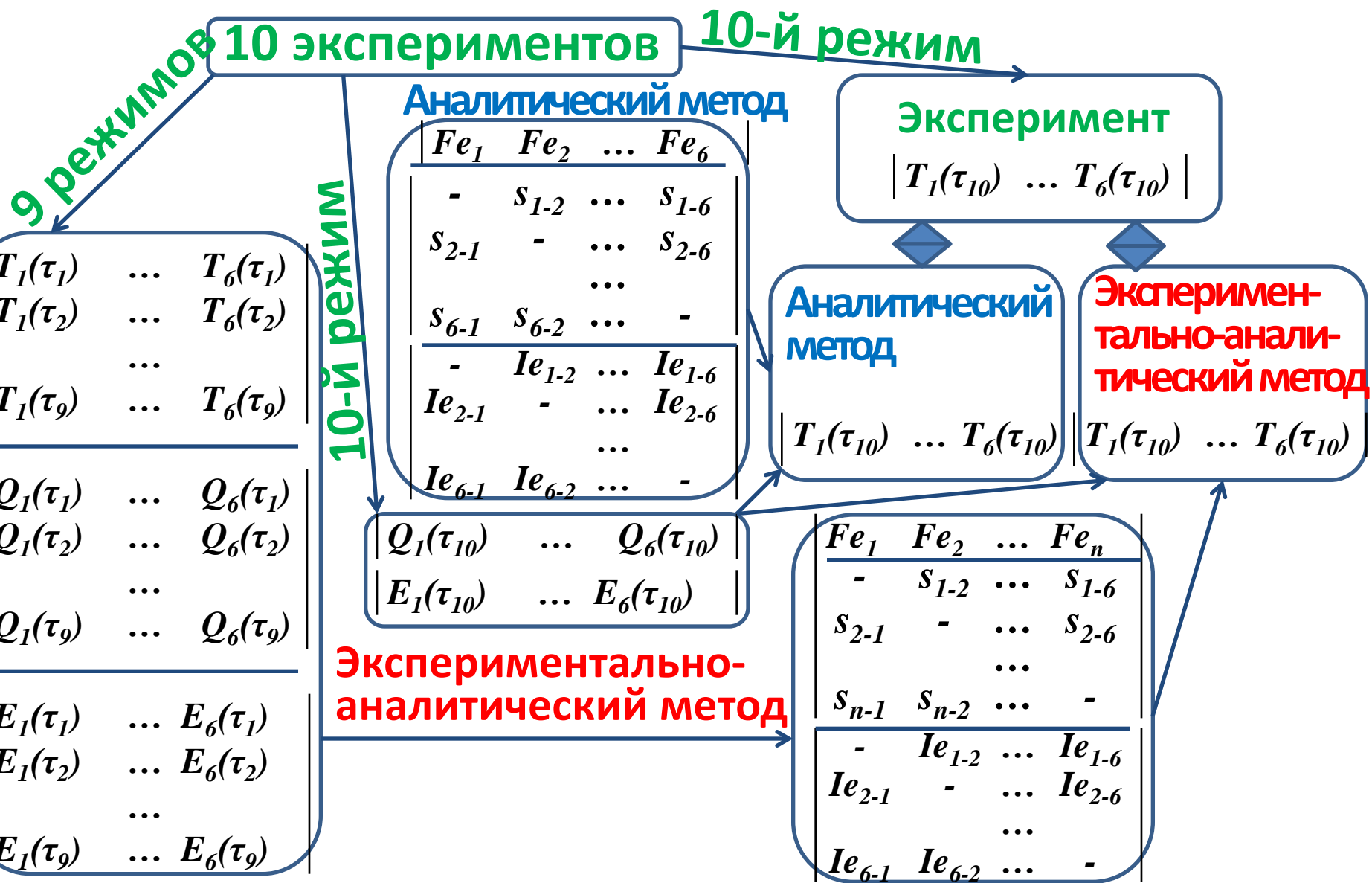
$$Fe_i = \varepsilon_i \cdot F_i$$

Комбинированные параметры

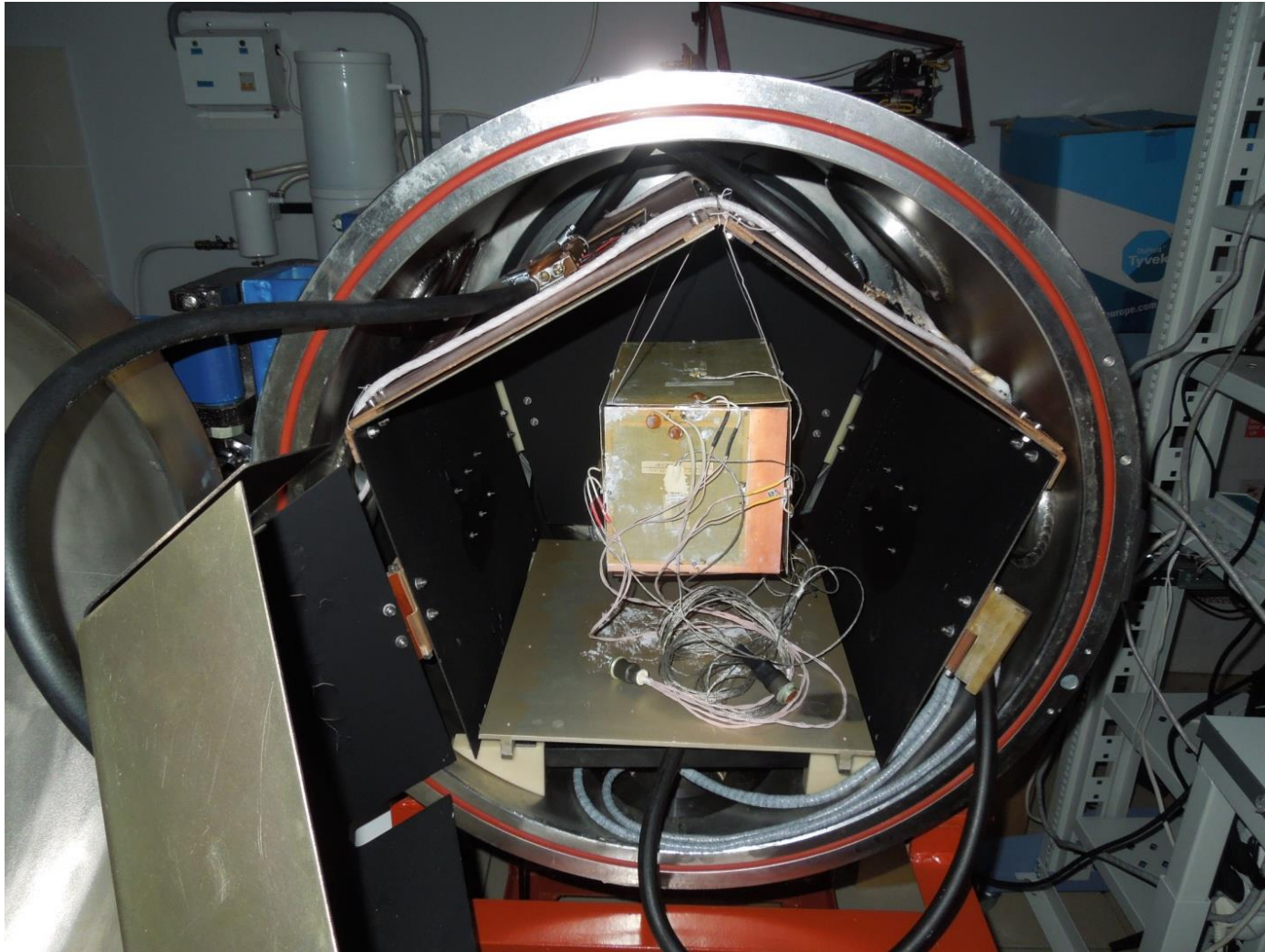
$$Ie_i = \frac{\varphi_{F'i-F'j} \cdot F'_i}{1 + \varphi_{F'i-F'j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F'j-F'i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)}$$

Fe_1	Fe_2	...	Fe_n
-	Ie_{1-2}	...	Ie_{1-n}
Ie_{2-1}	-	...	Ie_{n-1}
		...	
Ie_{n-1}	Ie_{n-2}	...	-

Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение

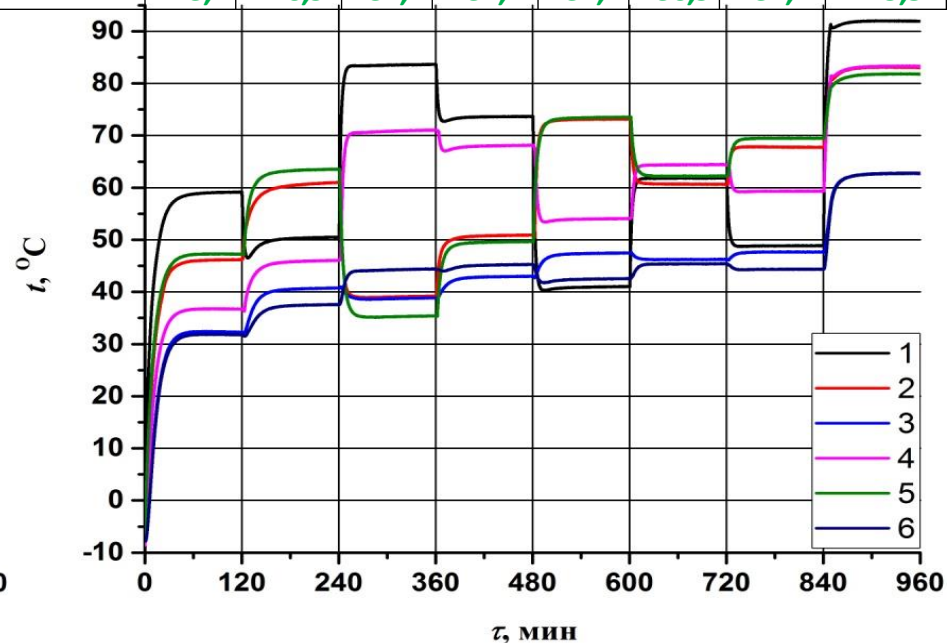
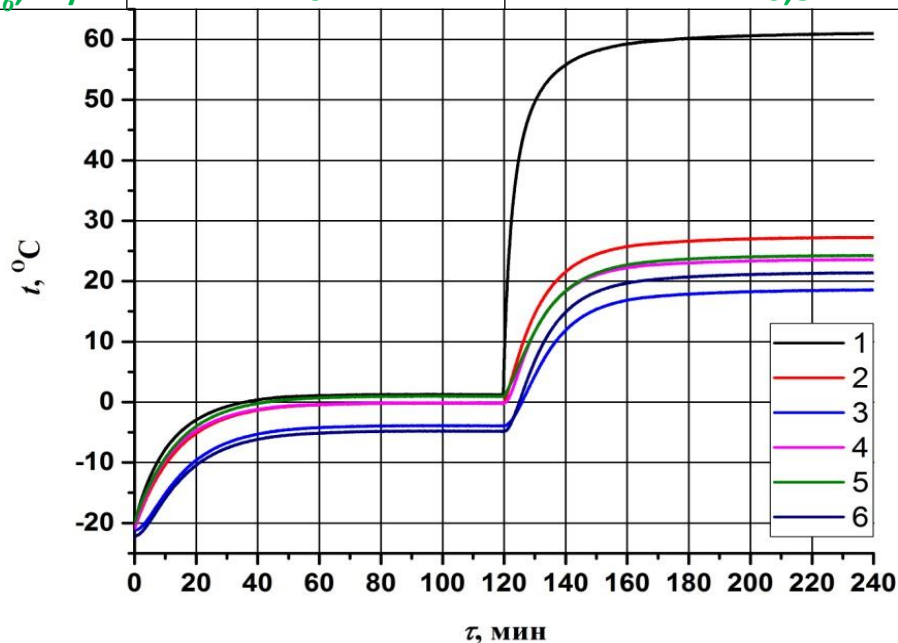


Экспериментально-аналитический метод – *экспериментальное подтверждение*



Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение

Режим	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_1 , Вт	3,72	24,12	19,07	11,53	30,34	23,06	3,78	15,26	8	26,5
Q_2 , Вт	3,38	5,9	12	17,9	2,8	9	24,7	15	20,5	21,5
Q_3 , Вт	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Q_4 , Вт	3,3	3,6	6,6	9,5	22	20	12	17,5	14,71	21
Q_5 , Вт	2	1,9	6	10,5	0,5	4	13	8	11	10,4
Q_6 , Вт	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E_1 , Вт/м ²	214,9	220,6	232,3	234,7	246,7	246,7	240,5	246,6	244,2	266,7
E_2 , Вт/м ²	214,2	219,4	232,4	238,7	237,7	242,6	249,1	247,7	250,3	265,9
E_3 , Вт/м ²	211,1	219,3	227,7	230,1	233,3	236,6	239,7	240,9	241,9	250,3
E_4 , Вт/м ²	214,3	218	231,4	235,9	250,5	250,6	244,8	250,9	248,7	267,3
E_5 , Вт/м ²	215,6	225,6	234,5	240,5	241,2	245,4	249,9	249,8	251,5	265,6
E_6 , Вт/м ²	207	210,8	223,4	226,9	231,7	234,1	234,7	236,9	237,1	249,5



Узел Режим (k)	1	2	3	4	5	6
$T_{ki}, \text{ K}$						
1	272,942	269,222	272,981	274,093	268,355	272,942
2	300,357	291,702	296,726	297,364	294,531	300,357
3	319,373	305,463	309,909	320,427	304,981	319,373
4	334,139	313,901	319,238	336,712	310,748	334,139
5	312,327	312,055	344,207	308,557	317,538	312,327
6	324,054	316,12	341,314	322,809	318,452	324,054
7	346,308	320,611	327,234	346,71	315,732	346,308
8	333,806	319,384	337,603	335,357	318,56	333,806
9	340,913	320,781	332,497	342,628	317,519	340,913
10	356,169	335,943	356,442	354,924	335,864	356,169
$E_{ki}, \text{ Bт/м}^2$						
1	214,9	214,2	211,1	214,3	215,6	207
2	220,6	219,4	219,3	218	225,6	210,8
3	232,3	232,4	227,7	231,4	234,5	223,4
4	234,7	238,7	230,1	235,9	240,5	226,9
5	246,7	237,7	233,3	250,5	241,2	231,7
6	246,7	242,6	236,6	250,6	245,4	234,1
7	240,5	249,1	239,7	244,8	249,9	234,7
8	246,6	247,7	240,9	250,9	249,8	236,9
9	244,2	250,3	241,9	248,7	251,5	237,1
10	266,7	265,9	250,3	267,3	265,6	249,5
$Q_{ki}, \text{ Bт}$						
1	3,72	3,38	0	3,3	2	0
2	24,12	5,9	0	3,6	1,9	0
3	19,07	12	0	6,6	6	0
4	11,53	17,9	0	9,5	10,5	0
5	30,34	2,8	0	22	0,5	0
6	23,06	9	0	20	4	0
7	3,78	24,7	0	12	13	0
8	15,26	15	0	17,5	8	0
9	8	20,5	0	14,71	11	0
10	26,5	21,5	0	21	10,4	0

$T_1(\tau_1)$	...	$T_6(\tau_1)$	$Q_1(\tau_1)$	...	$Q_6(\tau_1)$	$E_1(\tau_1)$	...	$E_6(\tau_1)$
$T_1(\tau_2)$	...	$T_6(\tau_2)$	$Q_1(\tau_2)$	...	$Q_6(\tau_2)$	$E_1(\tau_2)$	...	$E_6(\tau_2)$
...
$T_1(\tau_9)$	...	$T_6(\tau_9)$	$Q_1(\tau_9)$	...	$Q_6(\tau_9)$	$E_1(\tau_9)$	...	$E_6(\tau_9)$



λm	1	2	...	6	7	8	...	12	13	...	27	28	...	42	
	A:														b:
1	$\frac{dT_1(\tau_1)}{d\tau}$	0	...	0	$\frac{T_1^4(\tau_1)-E_{p1}(\tau_1)}{T_2(\tau_1)}$	0	...	0	$\frac{T_1^4(\tau_1)-E_{p1}(\tau_1)}{T_2(\tau_1)}$	...	0	$\frac{\sigma(T_1^4(\tau_1)-T_2^4(\tau_1))}{T_2^4(\tau_1)}$	...	0	$Q_1(\tau_1)$
2	0	$\frac{dT_2(\tau_1)}{d\tau}$	...	0	0	$\frac{T_2^4(\tau_1)-E_{p2}(\tau_1)}{T_3(\tau_1)}$	...	0	0	...	0	0	...	0	$Q_2(\tau_1)$
	...														
54	0	0	...	$\frac{dT_6(\tau_9)}{d\tau}$	0	0	...	$\frac{T_6^4(\tau_9)-E_{p6}(\tau_9)}{T_5(\tau_9)}$	0	...	$\frac{T_6^4(\tau_9)-E_{p6}(\tau_9)}{T_5(\tau_9)}$	0	...	$\frac{\sigma(T_6^4(\tau_9)-T_5^4(\tau_9))}{T_5^4(\tau_9)}$	$Q_6(\tau_9)$
	$x=(A^T \cdot A)^{-1} \cdot b:$														
	C_1	C_2	...	C_6	Fe_1	Fe_2	...	Fe_6	s_{1-2}	...	s_{5-6}	le_{1-2}	...	le_{5-6}	



Fe_1	Fe_2	...	Fe_6	-	s_{1-2}	...	s_{1-6}	-	le_{1-2}	...	le_{1-6}
				s_{2-1}	-	...	s_{2-6}	le_{2-1}	-	...	le_{2-6}
						
				s_{6-1}	s_{6-2}	...	-	le_{6-1}	le_{6-2}	...	-

Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение

Fe_1	Fe_2	Fe_3	Fe_4	Fe_5	Fe_6
0,0240295	0,0328179	0,0264673	0,0302332	0,0146036	-0,00268206
s_{1-2}	s_{1-3}	s_{1-4}	s_{1-5}	s_{1-6}	s_{2-3}
-0,0742522	0,341781	0,275281	-0,0670811	-0,152125	-1,1741
s_{2-4}	s_{2-5}	s_{2-6}	s_{3-4}	s_{3-5}	s_{3-6}
-0,02943	0,253511	0,487971	-0,252921	0,0101318	-0,0975873
s_{4-5}	s_{4-6}	s_{5-6}	Ie_{1-2}	Ie_{1-3}	Ie_{1-4}
0,0151904	-0,002011	-0,032385	-0,0264956	0,0179519	0,0334063
Ie_{1-5}	Ie_{1-6}	Ie_{2-3}	Ie_{2-4}	Ie_{2-5}	Ie_{2-6}
0,0188856	0,155495	-0,005279	-0,013463	-0,012231	0,181481
Ie_{3-4}	Ie_{3-5}	Ie_{3-6}			
-0,0034515	0,0126903	-0,01583			

Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение

Fe_1	Fe_2	Fe_3	Fe_4	Fe_5	Fe_6
0,0240295	0,0328179	0,0264673	0,0302332	0,0146036	-0,00268206
s_{1-2}	s_{1-3}	s_{1-4}	s_{1-5}	s_{1-6}	s_{2-3}
-0,0742522	0,341781	0,275281	-0,0670811	-0,152125	-1,1741
s_{2-4}	s_{2-5}	s_{2-6}	s_{3-4}	s_{3-5}	s_{3-6}
-0,02943	0,253511	0,487971	-0,252921	0,0101318	-0,0975873
s_{4-5}	s_{4-6}	s_{5-6}	Ie_{1-2}	Ie_{1-3}	Ie_{1-4}
0,0151904	-0,002011	-0,032385	-0,0264956	0,0179519	0,0334063
Ie_{1-5}	Ie_{1-6}	Ie_{2-3}	Ie_{2-4}	Ie_{2-5}	Ie_{2-6}
0,0188856	0,155495	-0,005279	-0,013463	-0,012231	0,181481
Ie_{3-4}	Ie_{3-5}	Ie_{3-6}			
-0,0034515	0,0126903	-0,01583			

16 параметров, не имеющих физический смысл!

Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение

Параметры	Fe_1	Fe_2	Fe_3	Fe_4	Fe_5	Fe_6
ЭА метод	0,030700947	0,030694	0,009577	0,030466	0,015006	0,006391
А метод	0,0306432	0,030643	0,00887	0,030643	0,015872	0,005888
Параметры	s_{1-2}	s_{1-3}	s_{1-4}	s_{1-5}	s_{1-6}	s_{2-3}
ЭА метод	0,011282	0,026266	0,019558	0,015367	0,027772	0,025423
А метод	0,018762	0,018762	0,021834	0,021834	0,02809	0,029155
Параметры	s_{2-4}	s_{2-5}	s_{2-6}	s_{3-4}	s_{3-5}	s_{3-6}
ЭА метод	0,017493	0,01838	0,030568	0,0131	0,008734	0,020378
А метод	0,029155	0,018762	0,021834	0,021834	0,014556	0,014556
Параметры	s_{4-5}	s_{4-6}	s_{5-6}	Ie_{1-2}	Ie_{1-3}	Ie_{1-4}
ЭА метод	0,008956	0,003033	0,007759	0,00335	0,001887	0,005172
А метод	0,008075	0,005054	0,008192	0,003145	0,003145	0,004914
Параметры	Ie_{1-5}	Ie_{1-6}	Ie_{2-3}	Ie_{2-4}	Ie_{2-5}	Ie_{2-6}
ЭА метод	0,009975	0,002748	0,001885	0,004743	0,003521	0,001509
А метод	0,008458	0,003136	0,003136	0,004957	0,002515	0,002515
Параметры	Ie_{3-4}	Ie_{3-5}	Ie_{3-6}			
ЭА метод	0,002627	0,003747	0,00193			
А метод	0,003154	0,003154	0,001378			

Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение

Аналитический метод

Fe_1	Fe_2	...	Fe_6
-	s_{1-2}	...	s_{1-6}
s_{2-1}	-	...	s_{2-6}
		...	
s_{6-1}	s_{6-2}	...	-
-	Ie_{1-2}	...	Ie_{1-6}
Ie_{2-1}	-	...	Ie_{2-6}
		...	
Ie_{6-1}	Ie_{6-2}	...	-

Эксперимент

$Q_1(\tau_{10})$	...	$Q_6(\tau_{10})$
$E_1(\tau_{10})$	...	$E_6(\tau_{10})$

Экспериментально-аналитический метод

Fe_1	Fe_2	...	Fe_n
-	s_{1-2}	...	s_{1-6}
s_{2-1}	-	...	s_{2-6}
		...	
s_{n-1}	s_{n-2}	...	-
-	Ie_{1-2}	...	Ie_{1-6}
Ie_{2-1}	-	...	Ie_{2-6}
		...	
Ie_{6-1}	Ie_{6-2}	...	-

$$(\sigma \cdot T_i^4 - E_i) \cdot Fe_i + \sum_{j=1}^n (T_i - T_j) \cdot s_{i-j} + \sum_{j=1}^n \sigma \cdot (T_i^4 - T_j^4) \cdot Ie_{i-j} = Q_i$$

$(i \neq j)$
 $(i \neq j)$

Аналитический метод

$T_1(\tau_{10})$...	$T_6(\tau_{10})$
------------------	-----	------------------

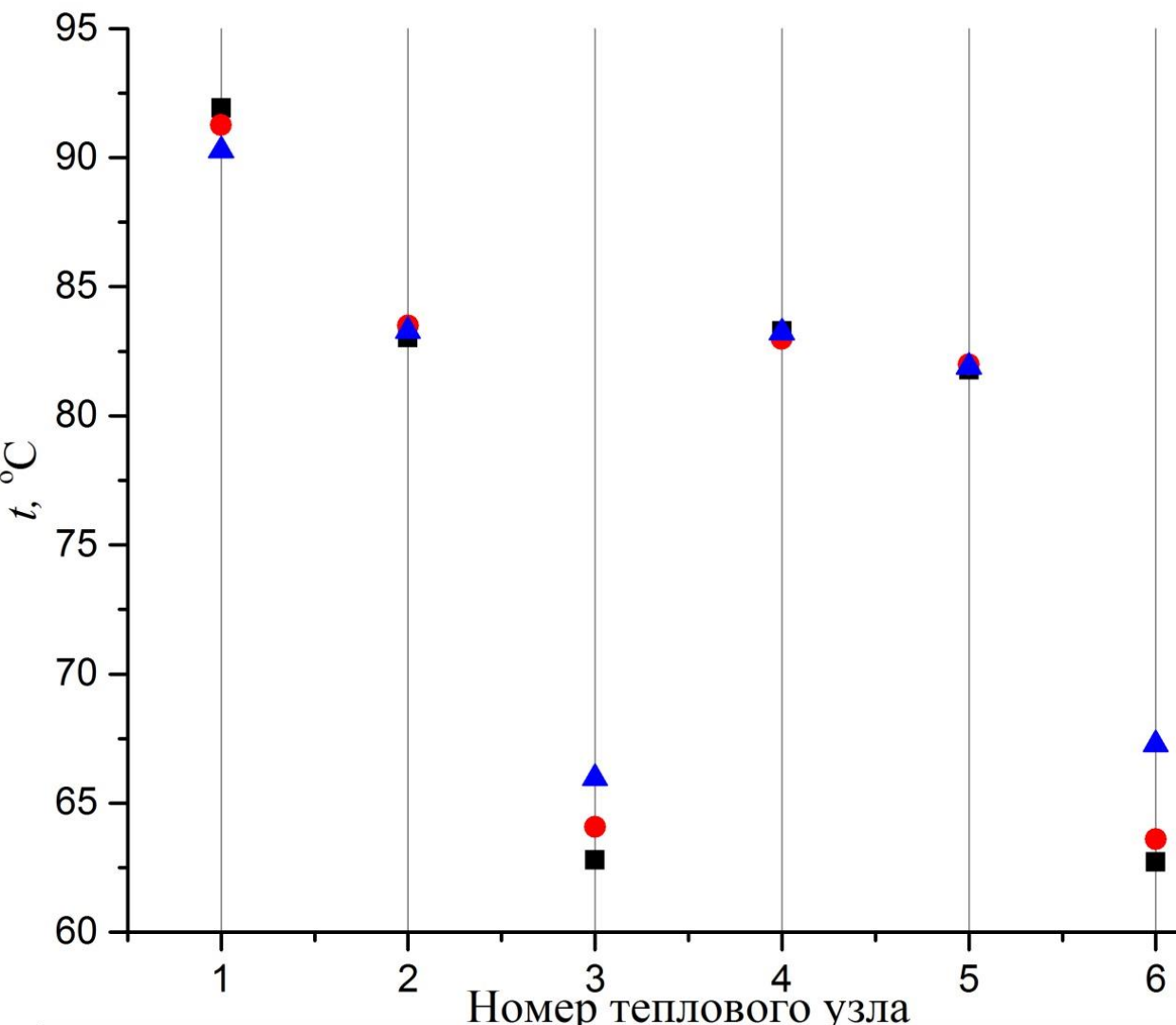
Эксперимент

$T_1(\tau_{10})$...	$T_6(\tau_{10})$
------------------	-----	------------------

Экспериментально-аналитический метод

$T_1(\tau_{10})$...	$T_6(\tau_{10})$
------------------	-----	------------------

Экспериментально-аналитический метод – *экспериментальное подтверждение*

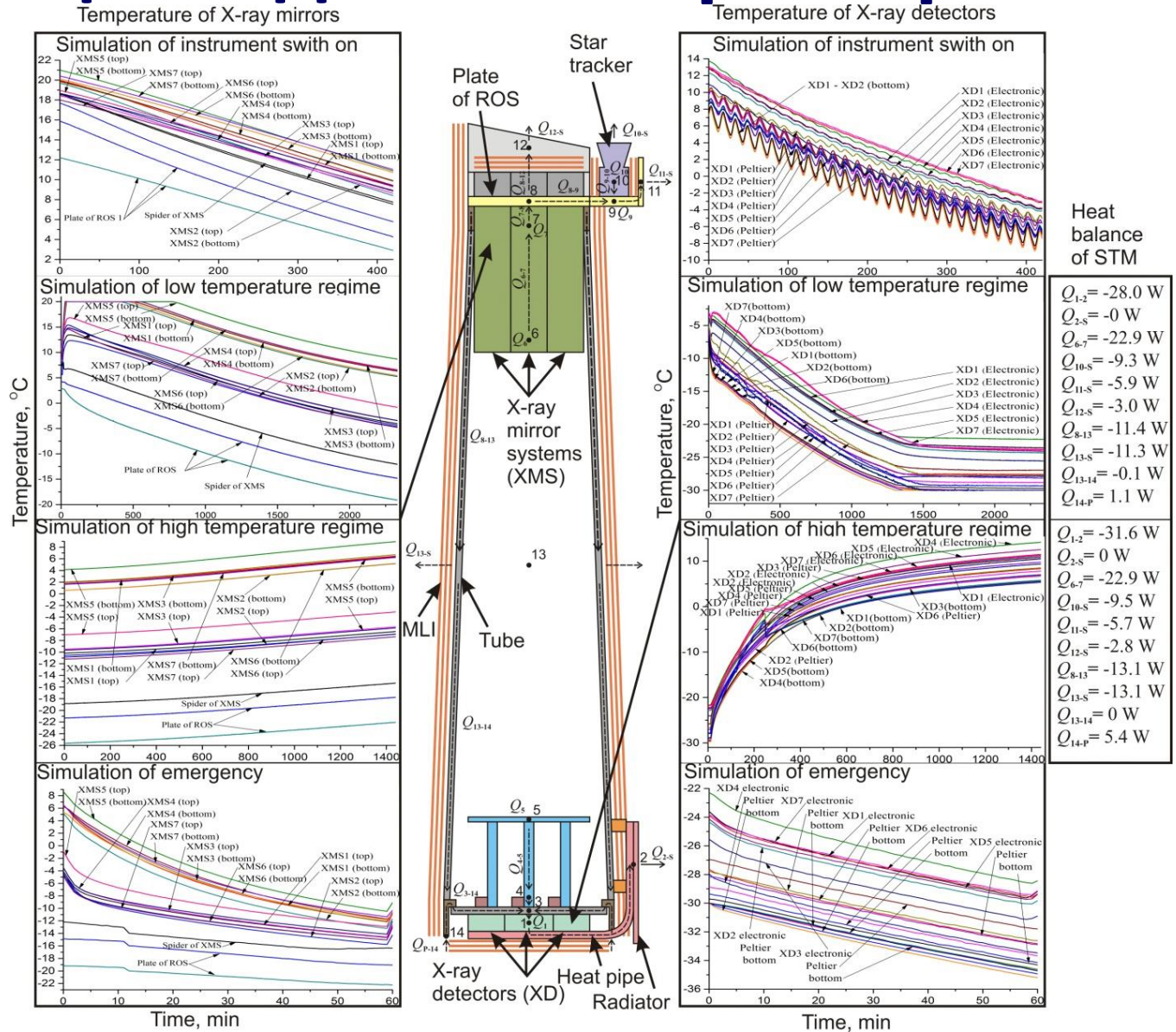


№ узла	Отличие расчета от эксперимента, Δt , C°	
	ЭА метод	А метод
1	0,655	1,645
2	0,481	0,261
3	1,277	3,177
4	0,312	0,072
5	0,216	0,126
6	0,886	4,566
Σ	3,827	9,847

■ - эксперимент ● - экспериментально-аналитическая модель
▲ - аналитическая модель

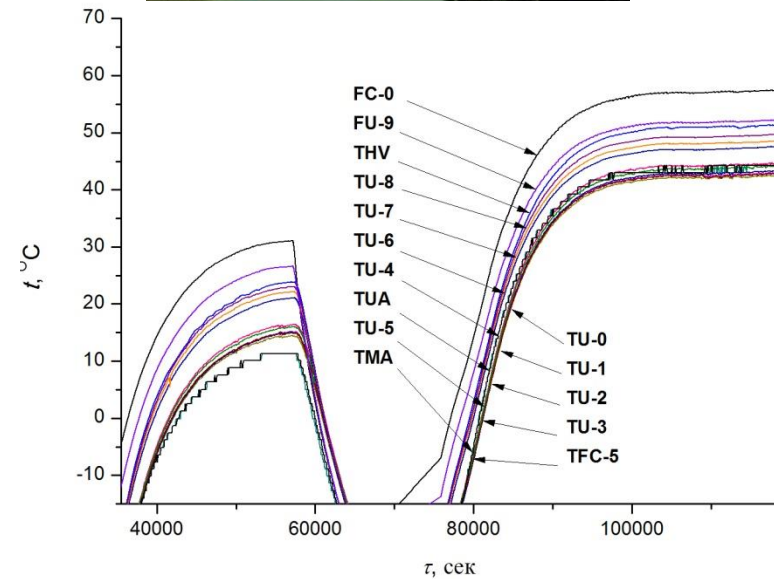
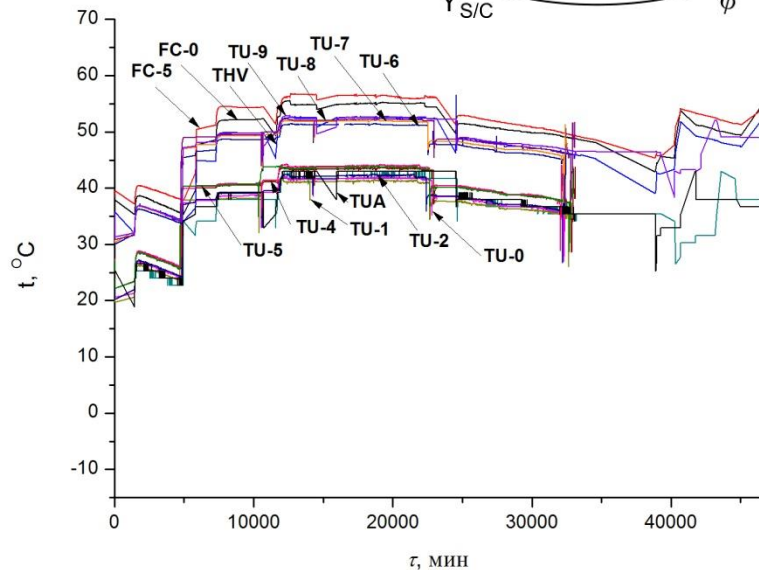
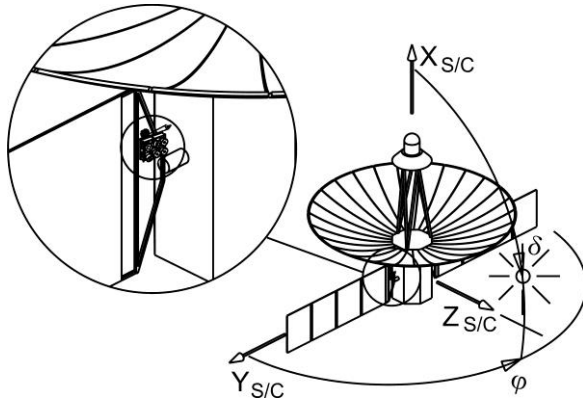
Использование метода в режиме коррекции отдельных параметров

НГМТЭ
ART-XC

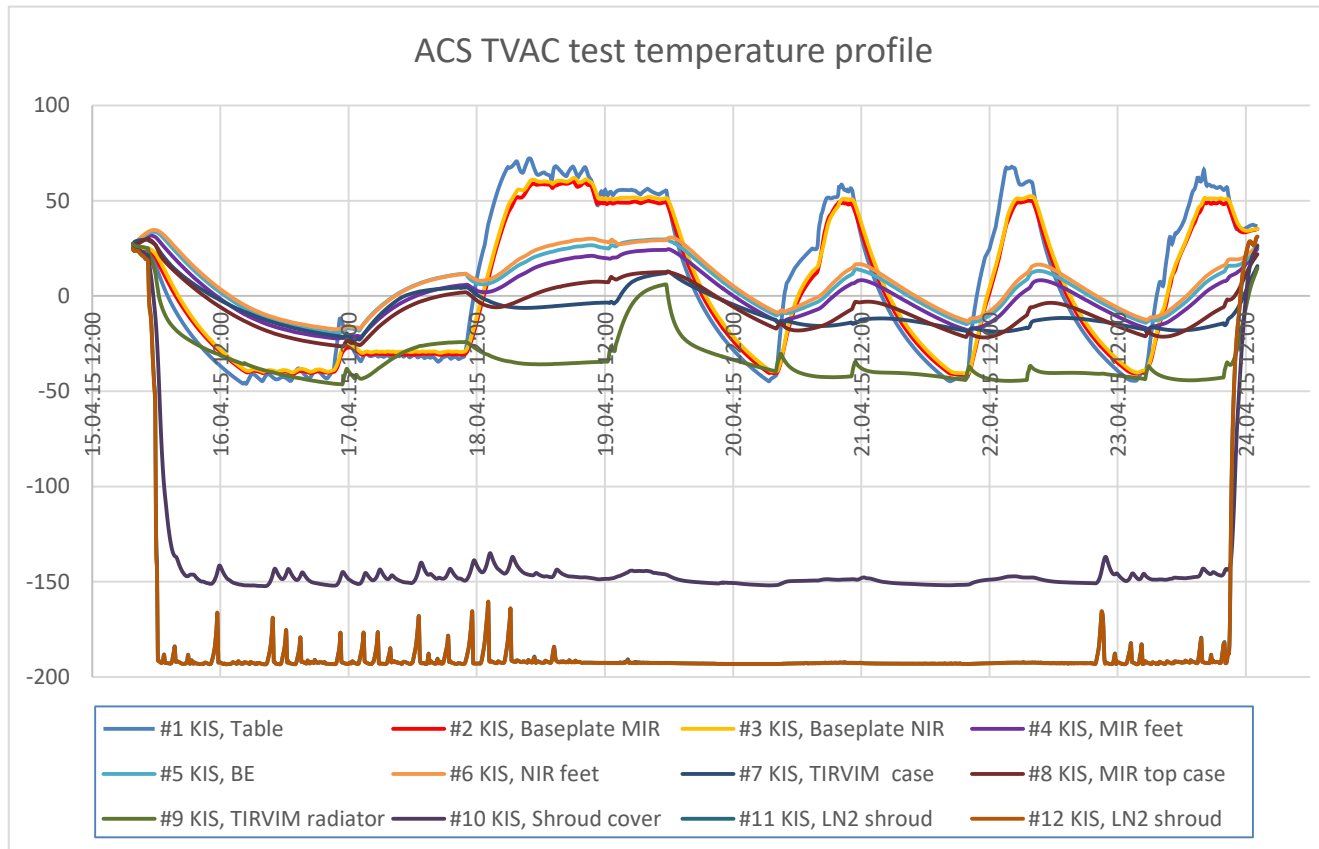


Использование метода в режиме коррекции отдельных параметров

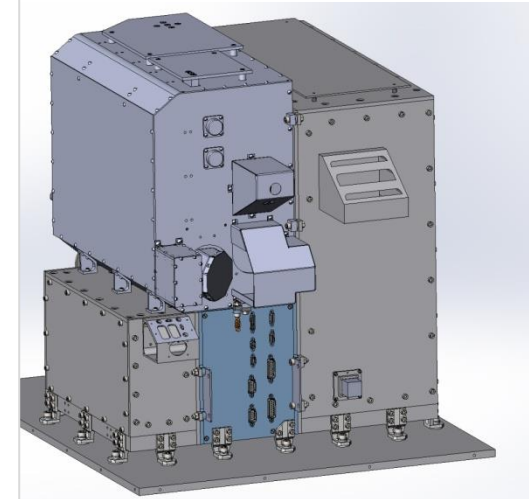
БМСВ (СПЕКТР-Р)



Использование метода в режиме коррекции отдельных параметров



АЦС



Заключение

1. Узловая математическая модель объекта, предназначенного для эксплуатации в космическом пространстве, может быть сформирована на базе результатов тепловакуумного эксперимента путем решения обратной задачи по восстановлению параметров математической модели из экспериментальных данных.

2. Предложенный экспериментально-аналитический метод существенно повышает информативную значимость тепловакуумных испытаний космического устройства, позволяя распространить их результаты на все возможные тепловые режимы устройства, в том числе не воспроизводимые при испытаниях.

Заключение

3. Экспериментальные исследования применимости данного метода показали, что значения тепловых параметров узловой модели, определенные экспериментально-аналитическим методом, имеют более высокую достоверность по сравнению со значениями, определенными аналитически.

4. Применимость экспериментально-аналитического метода может быть расширена за счет комбинирования с аналитическим методом. При этом достоверно вычисляемые тепловые параметры узловой математической модели рассчитываются аналитически, а остальные определяются экспериментально-аналитическим методом.

Благодарность

Сербинову Дмитрию –
за подготовку эксперимента

Семене Андрею –
*за помощь в обработке
экспериментальных данных*