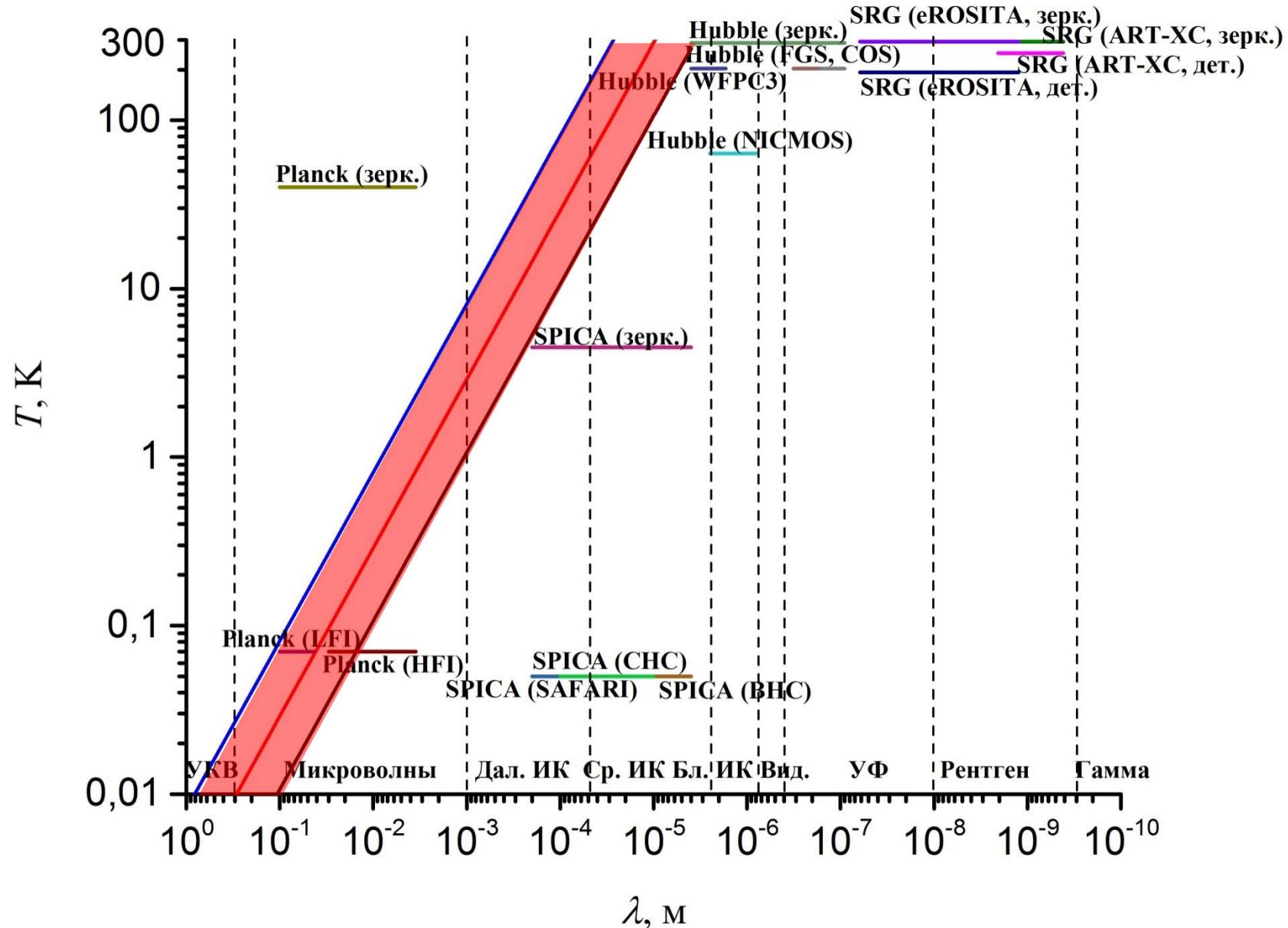


МАТЕМАТИЧЕСКАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ТЕПЛОВОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА, ИМИТИРУЮЩЕГО
УСЛОВИЯ КОСМИЧЕСКОГО
ПРОСТРАНСТВА

Семена Н.П.

Научная составляющая тепловых задач

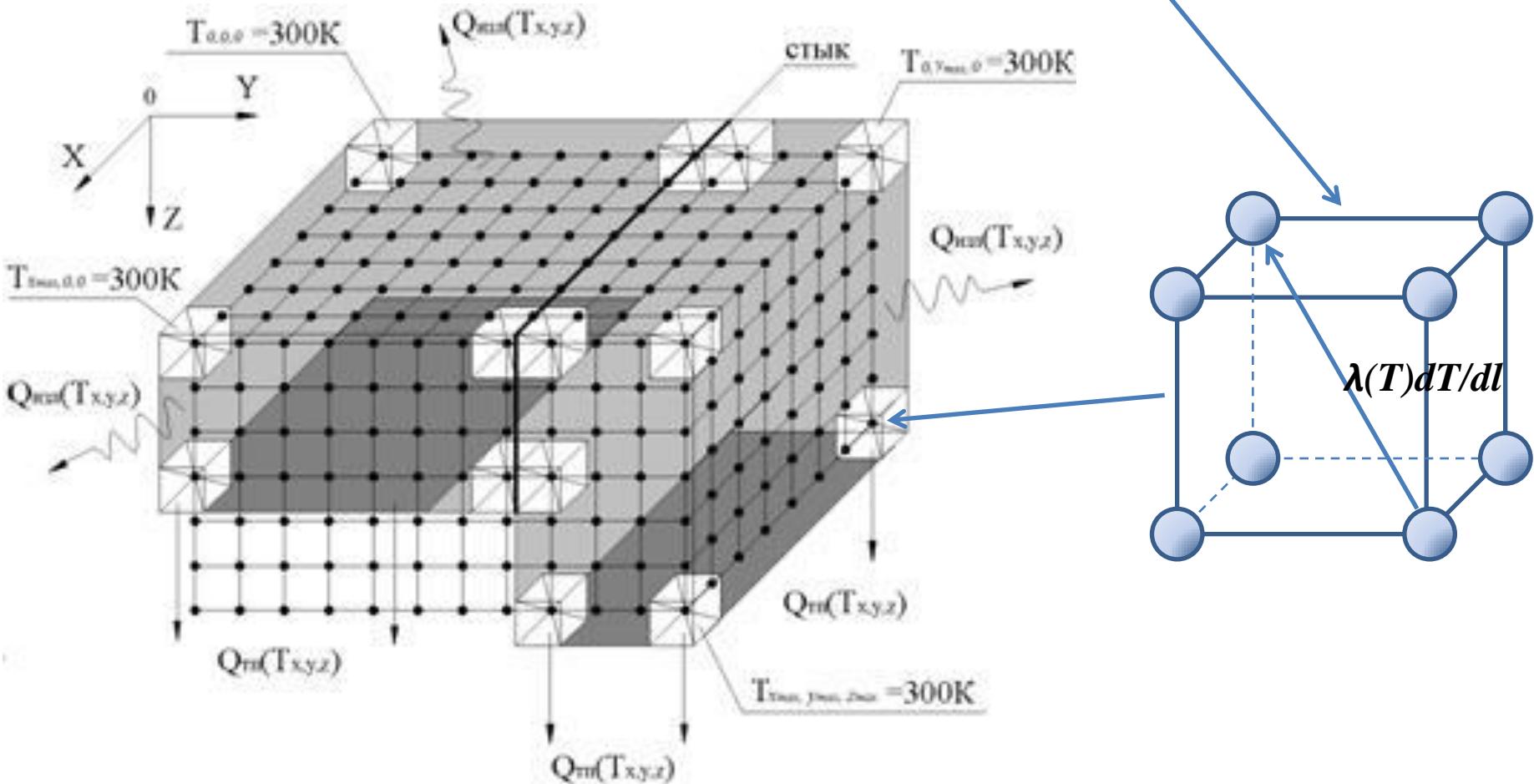


Научная составляющая тепловых задач

№	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	$-80 \pm 0,5$ °C	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	Точное поддержание температуры на низком уровне, высокая стабильность	
2	<i>CdTe</i> детекторы	-30 ± 2 °C	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	Точное поддержание температуры на низком уровне, высокая стабильность	
3	Рентгеновские зеркала	20 ± 2 °C	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	Точное поддержание температуры на нормальном уровне, высокая стабильность	
4	Бортовые стандарты частоты	20 ± 10 °C	$\pm 0,01 \dots 1$	$\pm 0,01 \dots 1$	Высокая стабильность	
5	Термостабилизированная электроника	20 ± 10 °C	$\pm 0,1 \dots 2$	$\pm 0,1 \dots 2$	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 практически для сложного объекта

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

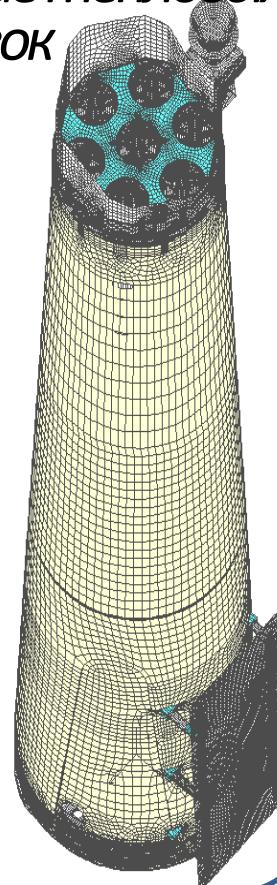


Конечно элементный метод – красиво, но не практично для сложного объекта

Исходные
данные

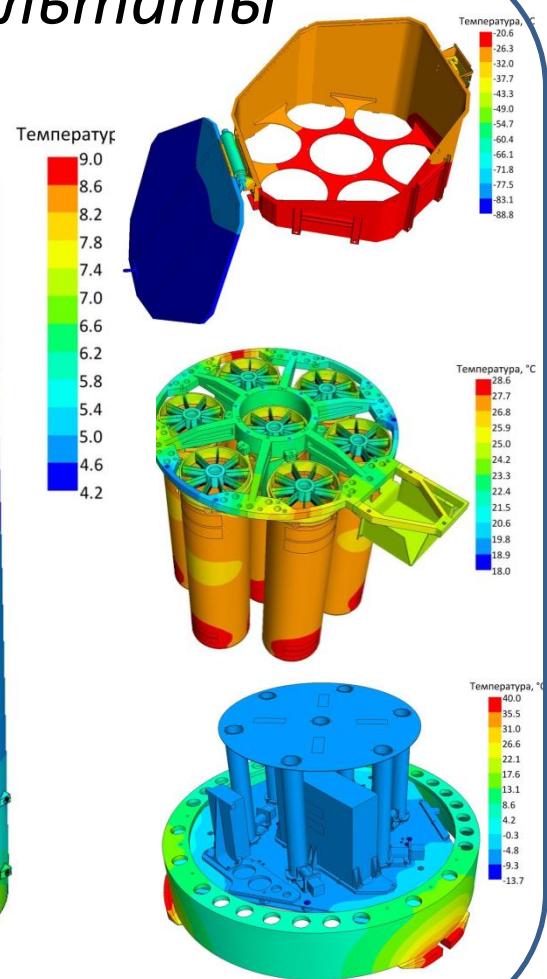


Упрощение
построение сетки
задание тепловых
нагрузок



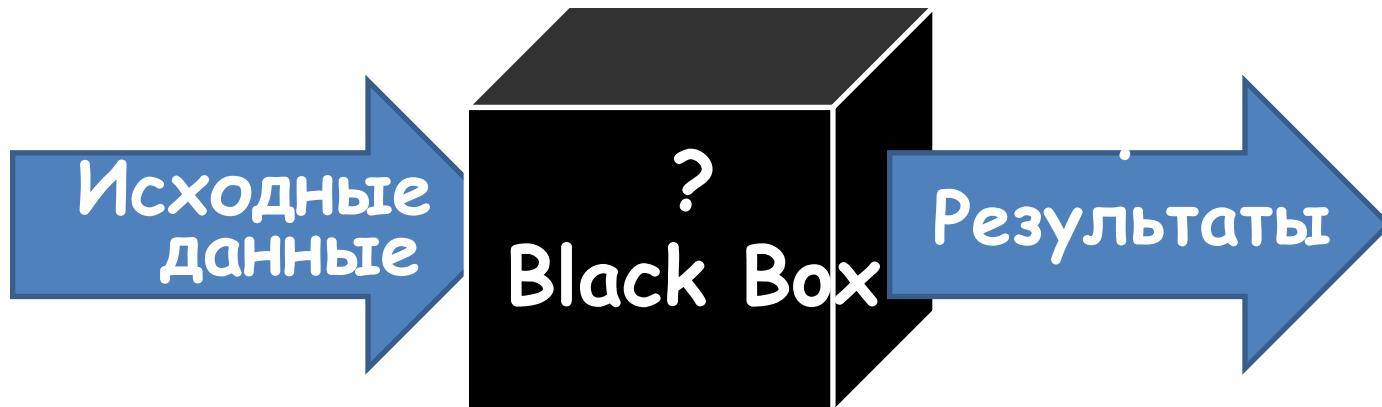
Моделирование

Результаты



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

- Отсутствие непосредственного доступа к уравнениям математической модели



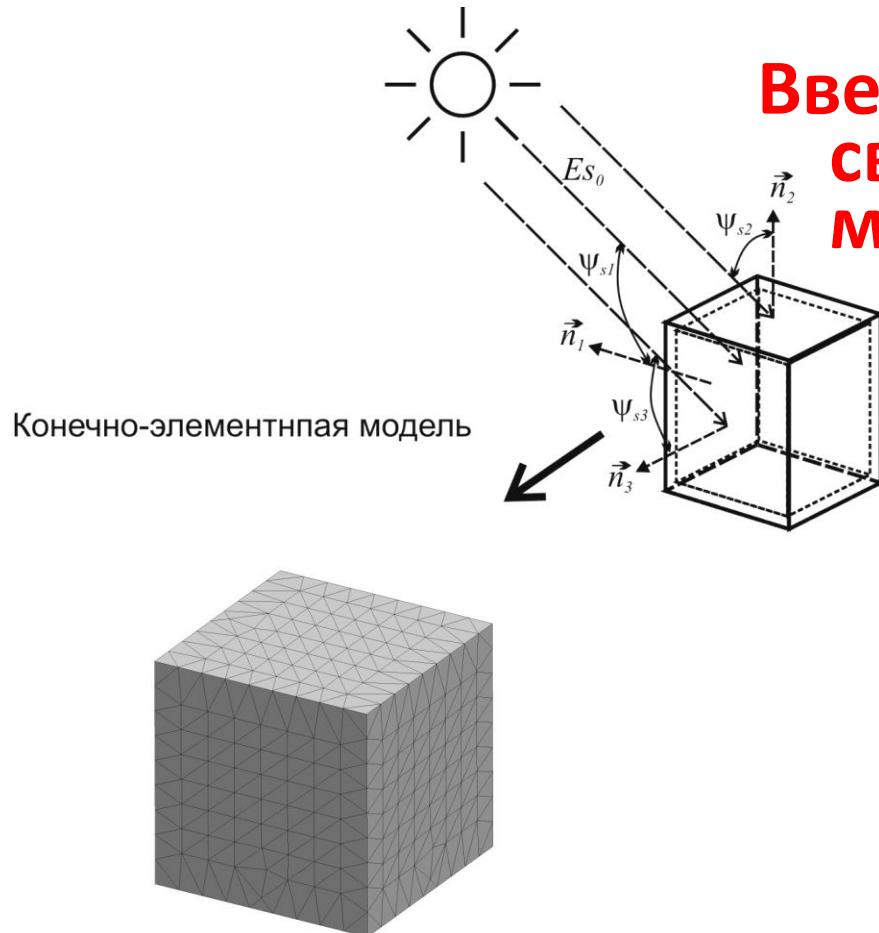
Конечно элементный метод – *красиво, но не практиично для сложного объекта*

- 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**)

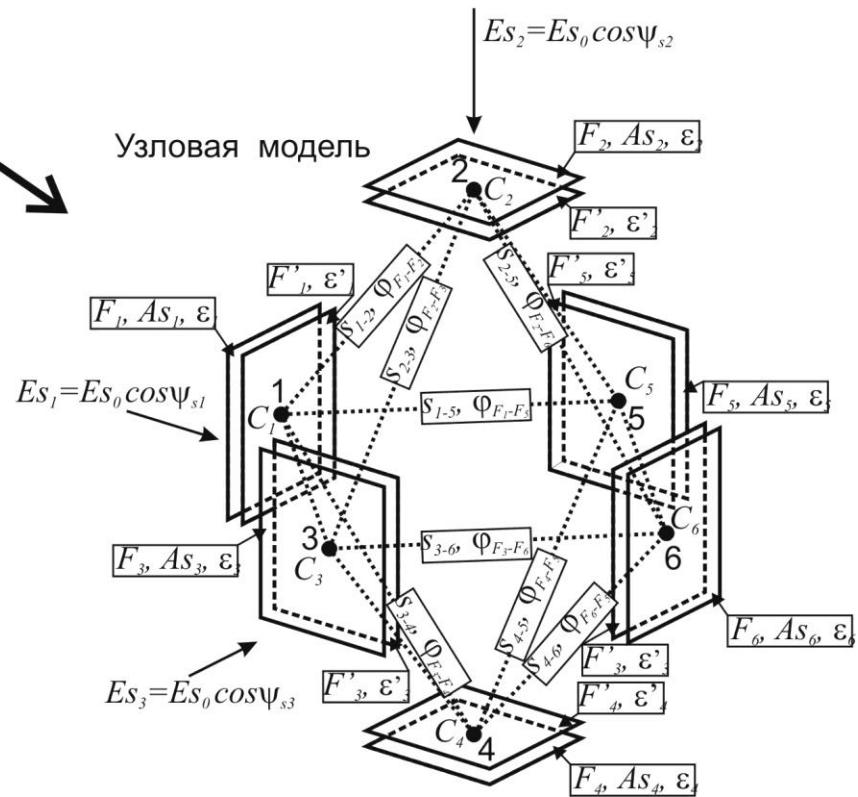
Конечно элементный метод –
красиво, но не практически для сложного объекта

➤ **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



Узловой метод – *практично, но не красиво*

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

Узловой метод – практично, но не красиво

$$\frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \cdot C_i = Q_i(\tau) + \text{Теплоемкость узла}$$

$$+ (A_{S_i} \cdot (E_{S_i}(\tau) + E_{Sp_i}(\tau) + E_{Sc_i}(\tau)) + \varepsilon_i \cdot (E_{P_i}(\tau) + E_{C_i}(\tau)) -$$

$$- \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_i^4(\tau)) \cdot F_i -$$

$$- \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n (T_i(\tau) - T_j(\tau)) \cdot s_{i-j} +$$

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

Узловой метод – практично, но не красиво

$$\frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \cdot C_i = Q_i(\tau) + \\ + (A s_i \cdot (E s_i(\tau) + E s p_i(\tau) + E s c_i(\tau)) + \varepsilon_i \cdot (E p_i(\tau) + E c_i(\tau)) - \\ - \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_i^4(\tau)) \cdot F_i -$$

$$- \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n (T_i(\tau) - T_j(\tau)) \cdot s_{i-j} +$$

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

Узловой метод – практично, но не красиво

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

*Ea_i - поглощенный
узлом тепловой поток*

Узловой метод – практично, но не красиво

$$\begin{aligned} \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \cdot C_i &= Q_i(\tau) + \\ &+ (A_{S_i} \cdot (E_{S_i}(\tau) + E_{Sp_i}(\tau) + E_{Sc_i}(\tau)) + \varepsilon_i \cdot (E_{P_i}(\tau) + E_{C_i}(\tau)) - \\ &- \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_i^4(\tau)) \cdot F_i - \\ &- \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n (T_i(\tau) - T_j(\tau)) \cdot s_{i-j} + \end{aligned}$$

**Излученный узлом
тепловой поток**

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

Узловой метод – практично, но не красиво

$$\begin{aligned} \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} \cdot C_i &= Q_i(\tau) + \\ &+ (A s_i \cdot (E s_i(\tau) + E s p_i(\tau) + E s c_i(\tau)) + \varepsilon_i \cdot (E p_i(\tau) + E c_i(\tau)) - \\ &- \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_i^4(\tau)) \cdot F_i - \\ &- \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n (T_i(\tau) - T_j(\tau)) \cdot s_{i-j} + \\ &+ \end{aligned}$$

Кондуктивный
теплообмен с
другими узлами

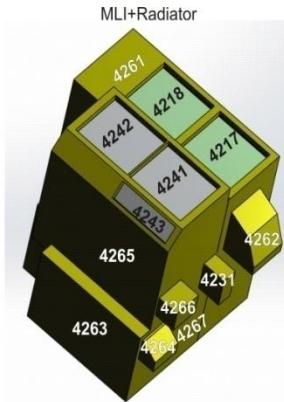
$$+ \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^n \sigma \cdot \frac{\varphi_{F' i - F' j}}{1 + \varphi_{F' i - F' j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F' j - F' i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)} \cdot (T_i^4(\tau) - T_j^4(\tau)) \cdot F'_i,$$

Узловой метод – практично, но не красиво

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

Радиационный теплообмен с другими узлами

Узловой метод – практично, но не красиво



4245
4216
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
...

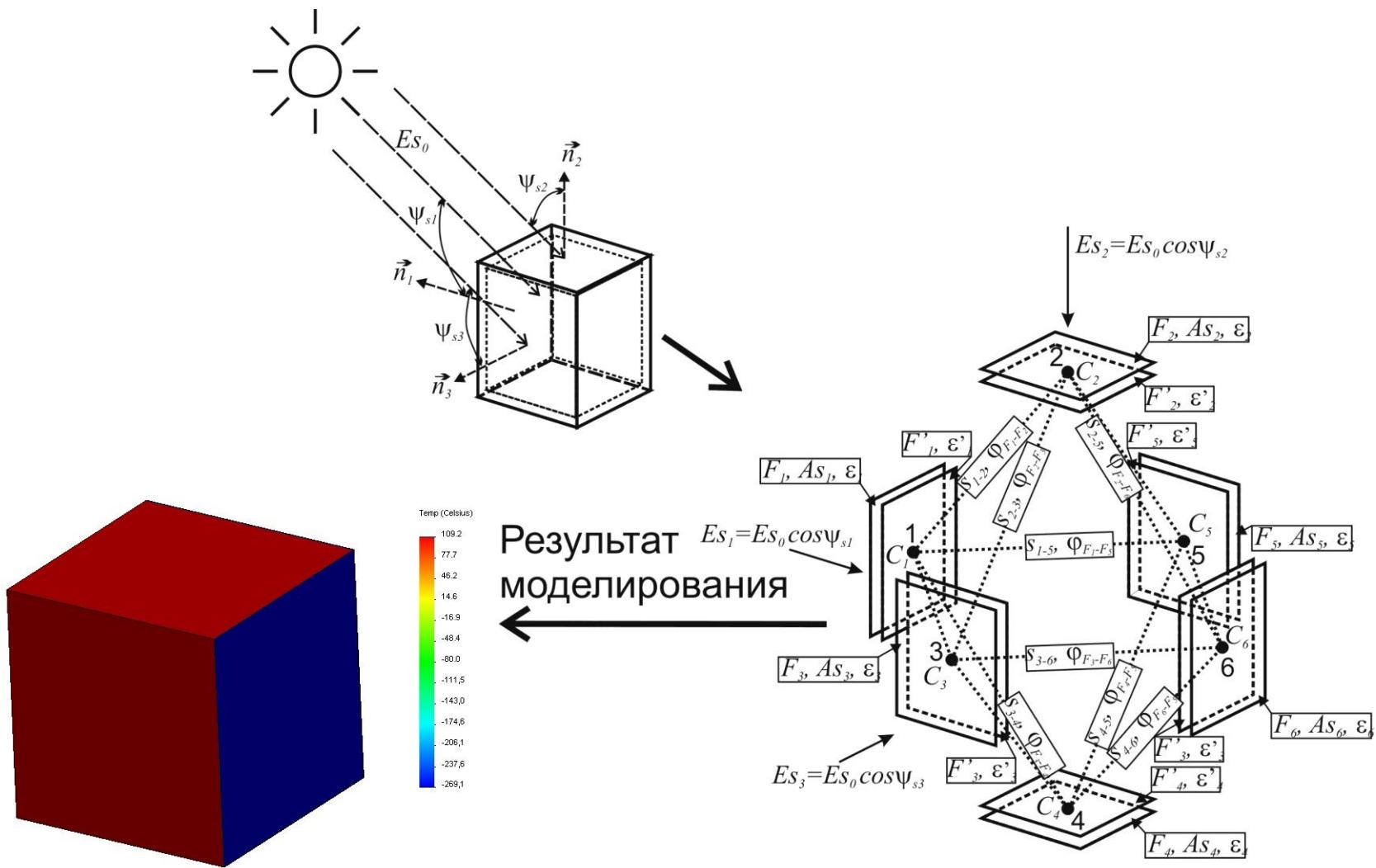
Узловой метод – *практично, но не красиво*

- 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 исследуя влияние параметров модели на температуру узлов

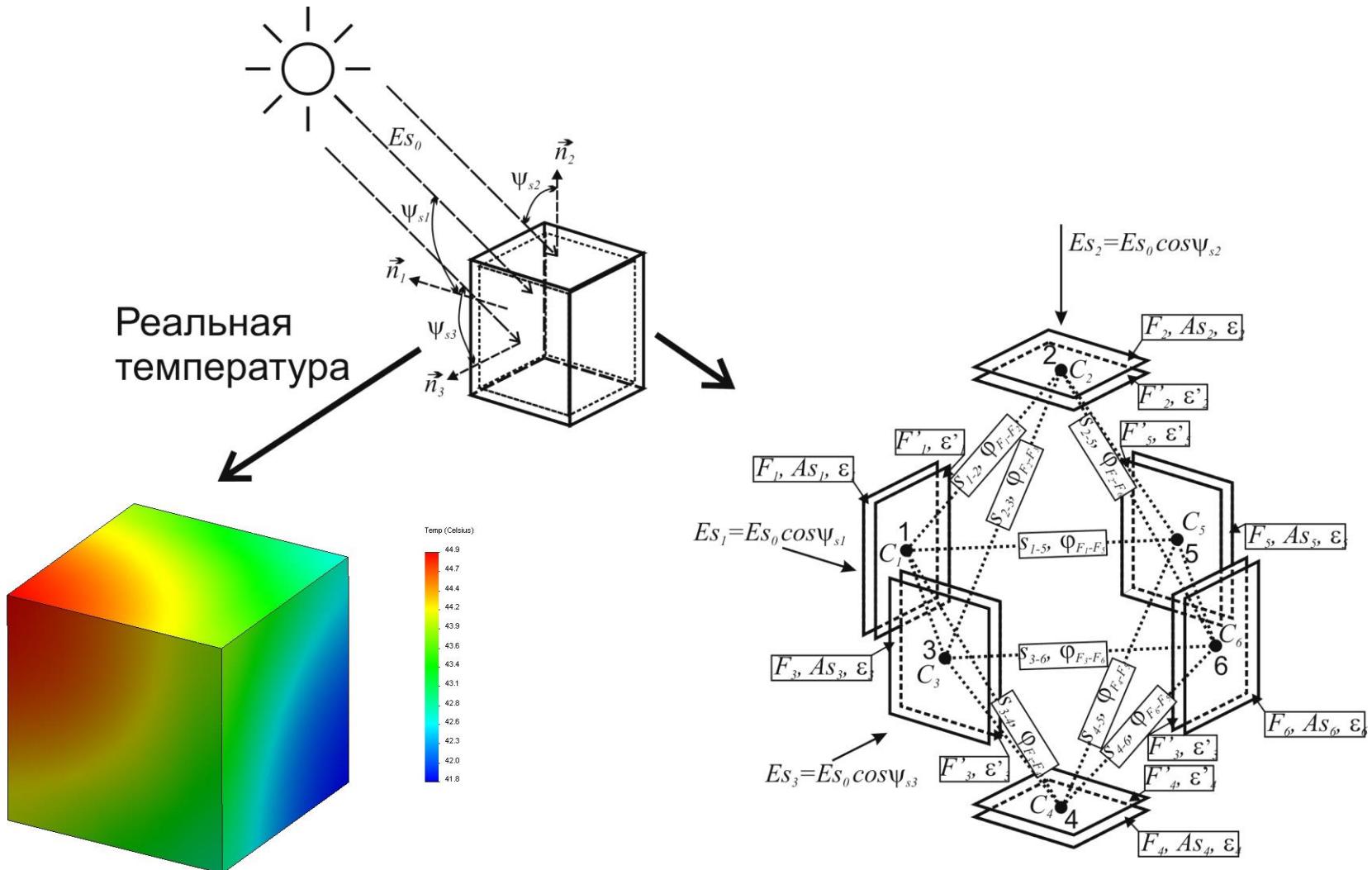
Узловой метод – *практично, но не красиво*

- 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 помощь узловой модели (при этом температуры остальных точек узла могут отклоняться от этих результатов)

Узловой метод – решение аналитическим методом



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

$$\begin{array}{cccc|cccc} Q_1(\tau_0) & Q_2(\tau_0) & \dots & Q_n(\tau_0) & T_1(\tau_1) & T_2(\tau_1) & \dots & T_n(\tau_1) \\ Q_1(\tau_1) & Q_2(\tau_1) & \dots & Q_n(\tau_1) & T_1(\tau_2) & T_2(\tau_2) & \dots & T_n(\tau_2) \\ & \dots & & & & & \dots & \\ Q_1(\tau_k) & Q_2(\tau_k) & \dots & Q_n(\tau_k) & T_1(\tau_k) & T_2(\tau_k) & \dots & T_n(\tau_k) \end{array}$$

Поглощенные потоки

$$\begin{array}{cccc|cccc} Ea_1(\tau_0) & Ea_2(\tau_0) & \dots & Ea_n(\tau_0) & & & & \\ Ea_1(\tau_1) & Ea_2(\tau_1) & \dots & Ea_n(\tau_1) & & & & \\ & \dots & & & & & & \\ Ea_1(\tau_k) & Ea_2(\tau_k) & \dots & Ea_n(\tau_k) & & & & \end{array}$$

Результаты

Параметры тепловых узлов

$$\begin{array}{cccccc} C_1 & As_1 & \varepsilon_1 & F_1 & \varepsilon'_1 & F'_1 \\ C_2 & As_2 & \varepsilon_2 & F_2 & \varepsilon'_2 & F'_2 \\ & & & & \dots & \\ C_n & As_n & \varepsilon_n & F_n & \varepsilon'_n & F'_n \end{array}$$

Тепловая проводимость

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

Угловые коэф-ты

$$\begin{array}{cccccc} & & \varphi_{F'1-F'2} & \dots & \varphi_{F'1-F'n} & \\ \varphi_{F'2-F'1} & & - & \dots & \varphi_{F'2-F'n} & \\ & & & \dots & & \\ \varphi_{F'n-F'1} & \varphi_{F'n-F'2} & \dots & - & & \end{array}$$

М
А
Н
О
В
Л
Е
Н
И
Е

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

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

($i \neq j$) Эффективная кондуктивная связь узлов

($i \neq j$) Эффективная радиационная связь узлов

Экспериментально-аналитический метод – учет использования экспериментальных данных

Задержка реакции термодатчиков

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

Приблизительное равенство

Экспериментально-аналитический метод – планирование эксперимента

Строка теплоемкостей

C_1

C_2

...

C_n

n

Строка эффективных площа-
дей внешнего теплообмена

Fe_1

Fe_2

...

Fe_n

n

Матрица эффективных
кондуктивных связей

s_{1-2}

s_{1-n}

...

s_{2-1}

s_{n-n}

...

s_{n-1}

s_{n-2}

...

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

Матрица эффективных
радиационных связей

Ie_{1-2}

Ie_{1-n}

...

Ie_{2-1}

Ie_{n-n}

...

Ie_{n-1}

Ie_{n-2}

...

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

Количество искомых параметров:

n^2+n

Требуемое количество тепловых
состояний при эксперименте:

$n+1$

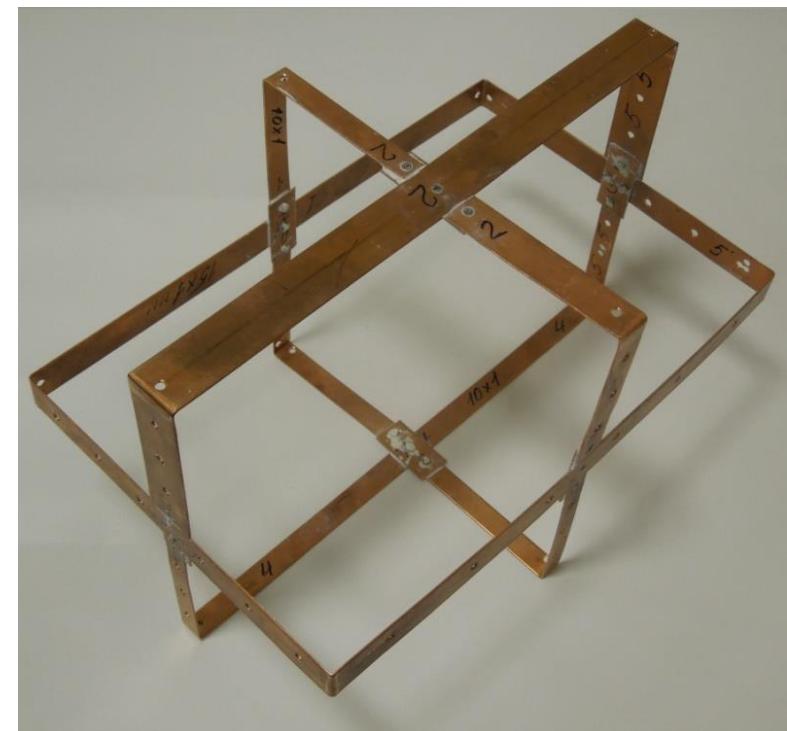
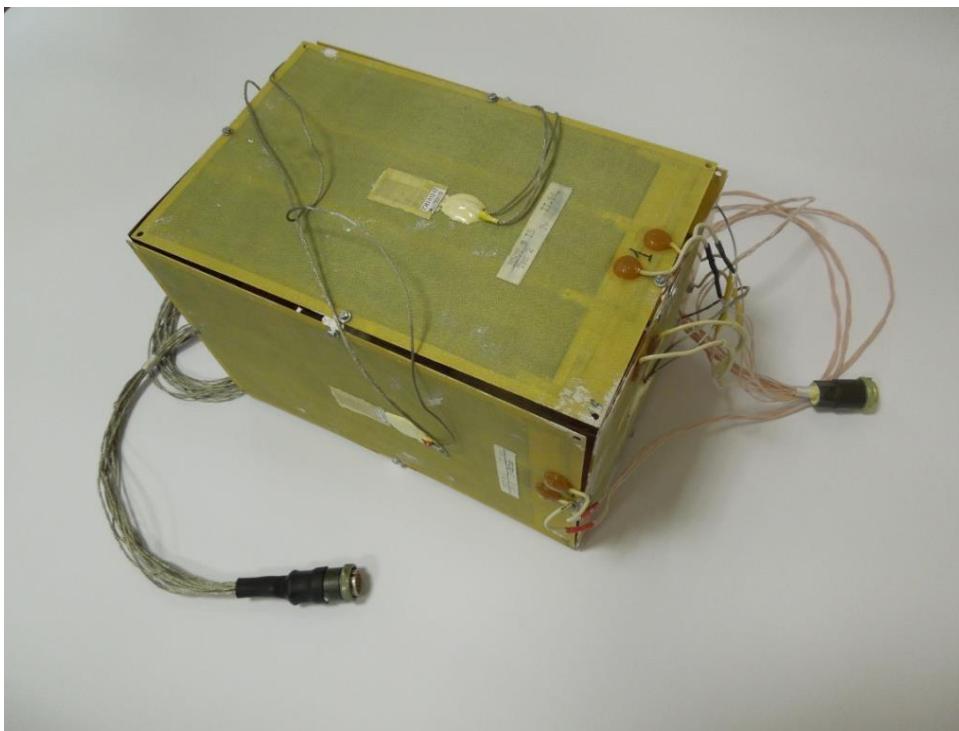
Экспериментально-аналитический метод – восстановление эффективных тепловых параметров методом наименьших квадратов

$l \setminus m$	1	2	...	n	$n+1$	$n+2$	...	$2n$	$2n+1$	...	$\frac{n^2+3n}{2}$	$(n^2+3n)/2+1$	...	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}	
$A:$															
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	...	$\sigma(T_n^4(\tau_k)$ - $T_{n-1}^4(\tau_k))$	$Q_n(\tau_k)$

$$\begin{array}{l}
 A \cdot x = b \quad \rightarrow \quad (A \cdot x - b)^T \cdot (A \cdot x - b) \rightarrow \min \\
 \quad \quad \quad A^T \cdot A \cdot x = A^T \cdot b \quad \quad \quad x = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot b
 \end{array}$$

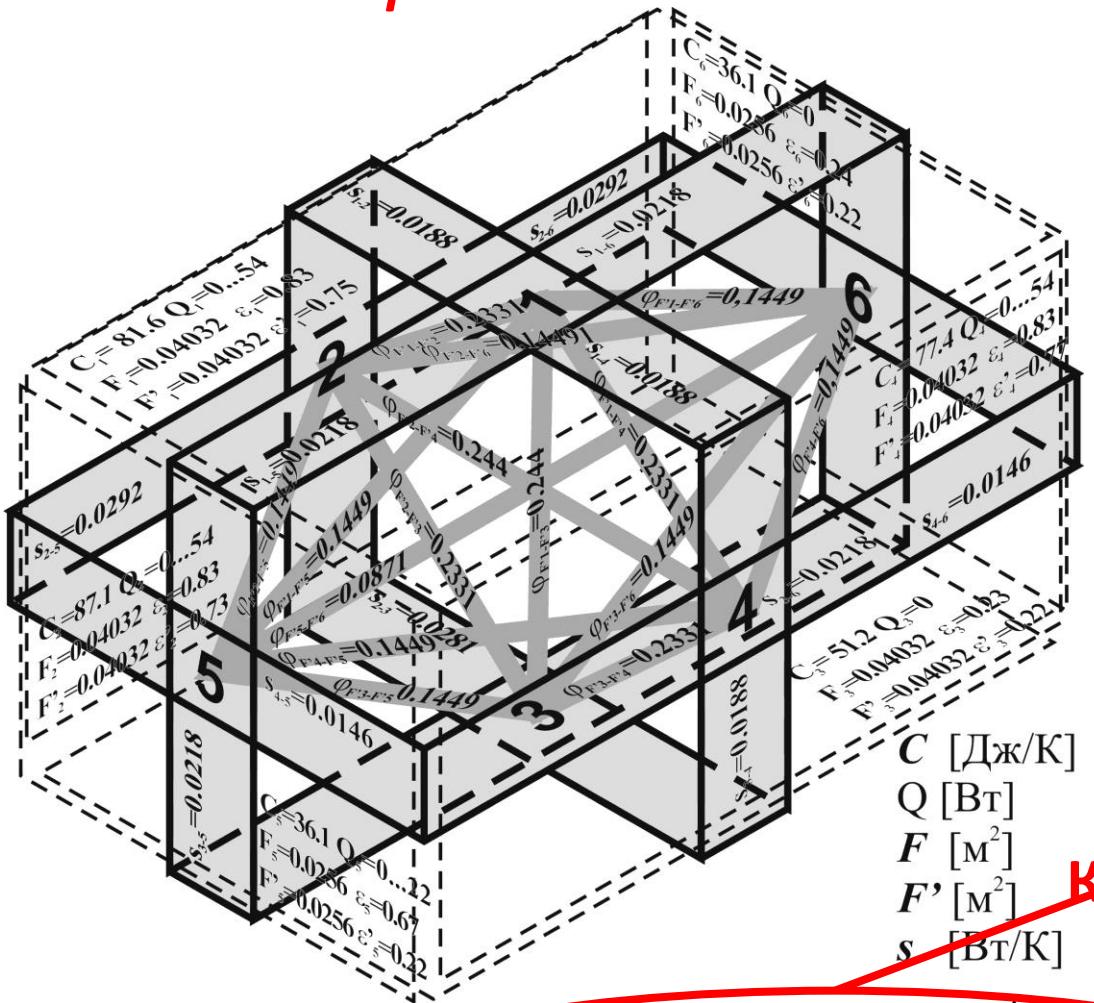
Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение

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

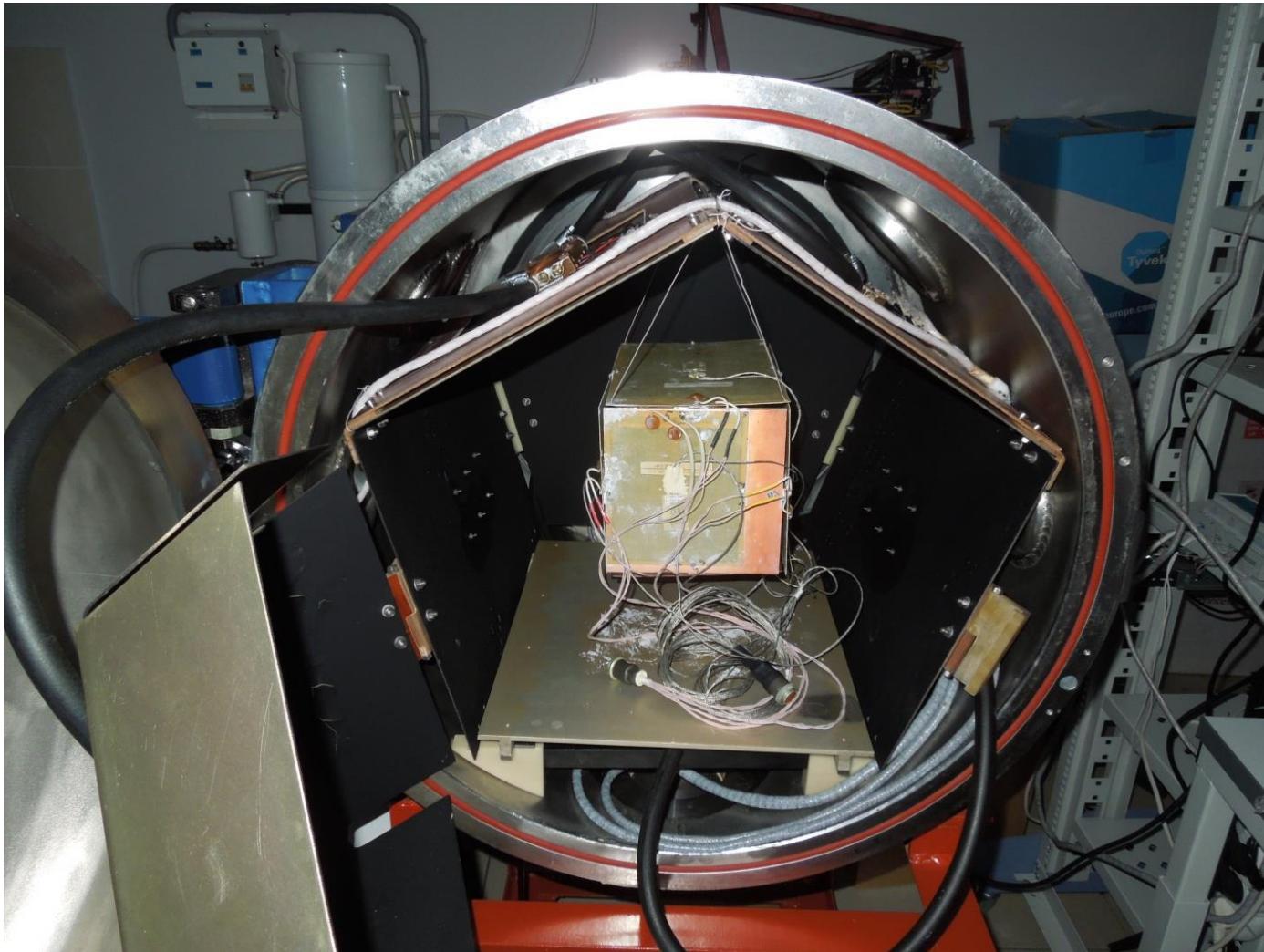
$$Ie_i = \frac{\varphi_{F'_i-F'_j} \cdot F'_i}{1 + \varphi_{F'_i-F'_j} \cdot (\varepsilon_i'^{-1} - 1) + \varphi_{F'_j-F'_i} \cdot (\varepsilon_j'^{-1} - 1)}$$

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

Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение

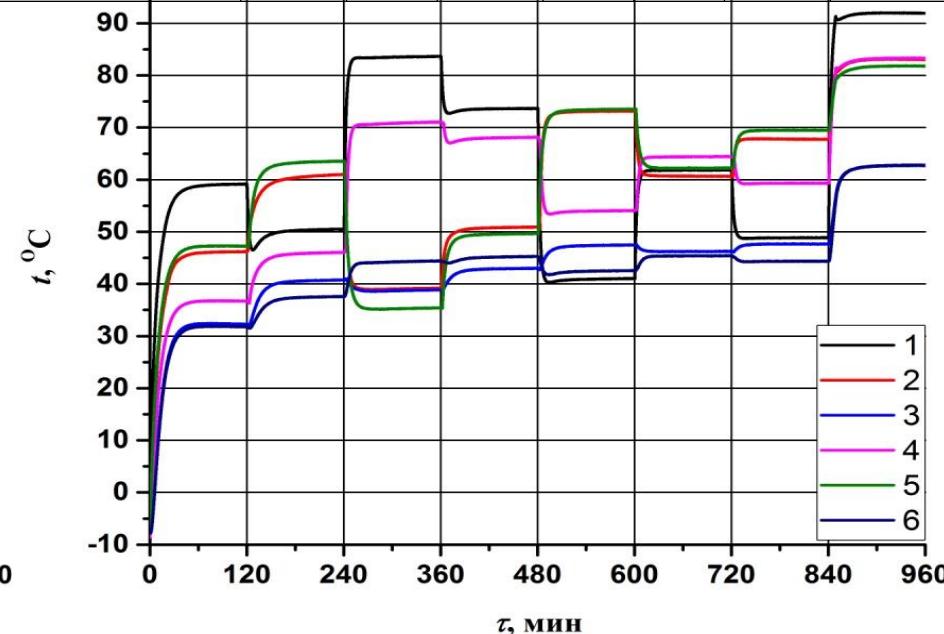
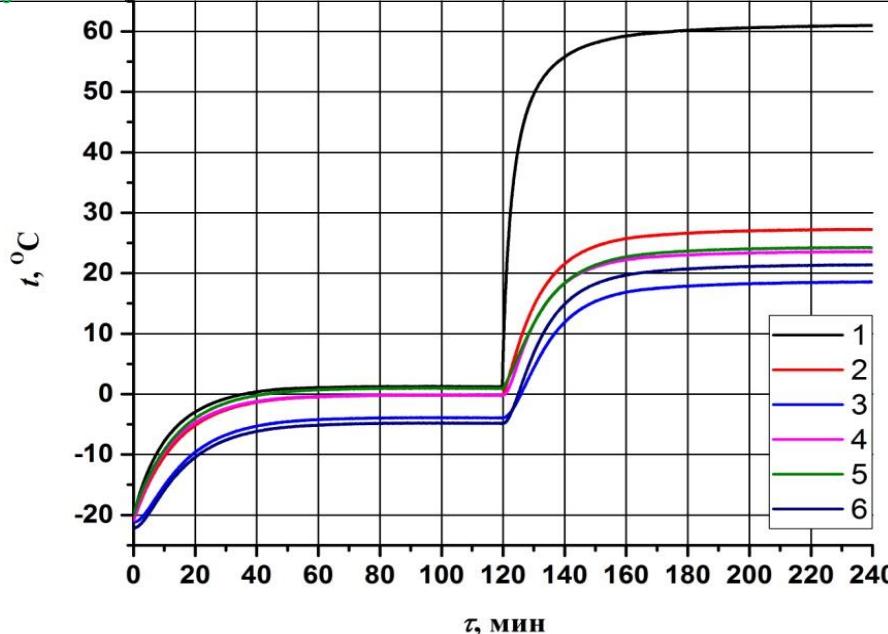


Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение



Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение

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



Узел Режим (k)	(i)	1	2	3	4	5	6
T_{ki}, 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	
$E_{ki}, \text{BT/M}^2$							
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}, BT							
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	

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



lm	1	2	...	6	7	8	...	12	13	...	27	28	...	42	$b:$
$A:$															
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	$Q_2(\tau_1)$
...															
54	0	0	...	$\frac{dT_6(\tau_9)}{d\tau}$	0	0	...	$T_6^4(\tau_9)$ - $Ep_6(\tau_9)$	0	...	$T_6(\tau_9)$ - $T_5(\tau_9)$	0	...	$\sigma(T_6^4(\tau_9)$ - $T_5^4(\tau_9))$	$Q_6(\tau_9)$
$x = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot b:$															
	C_1	C_2	...	C_6	Fe_1	Fe_2	...	Fe_6	s_{1-2}	...	s_{5-6}	Ie_{1-2}	...	Ie_{5-6}	



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

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

Аналитический метод

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

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}	...	-

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

Эксперимент

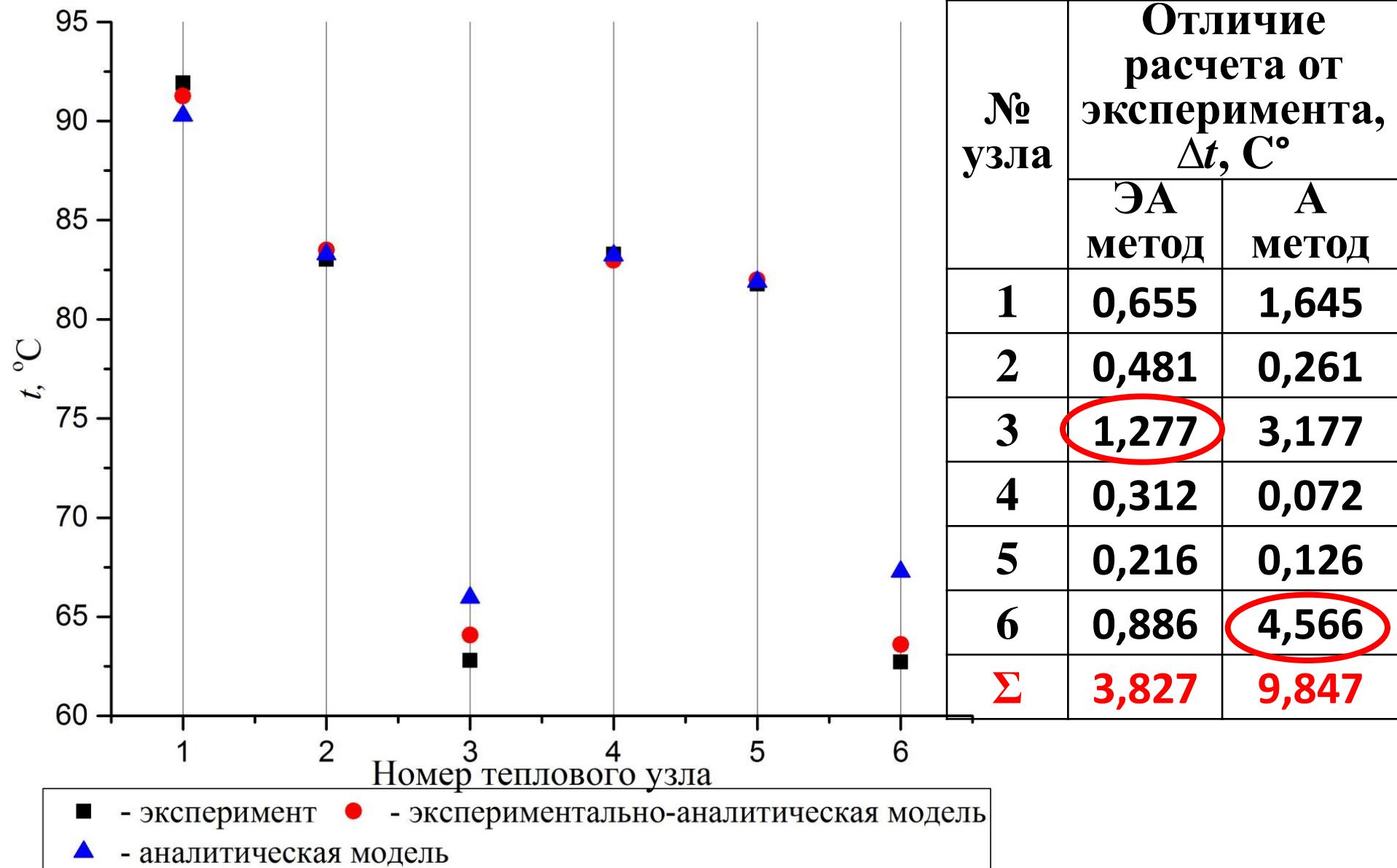
$T_1(\tau_{10})$...	$T_6(\tau_{10})$
------------------	-----	------------------

Экспериментально-аналитический метод

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

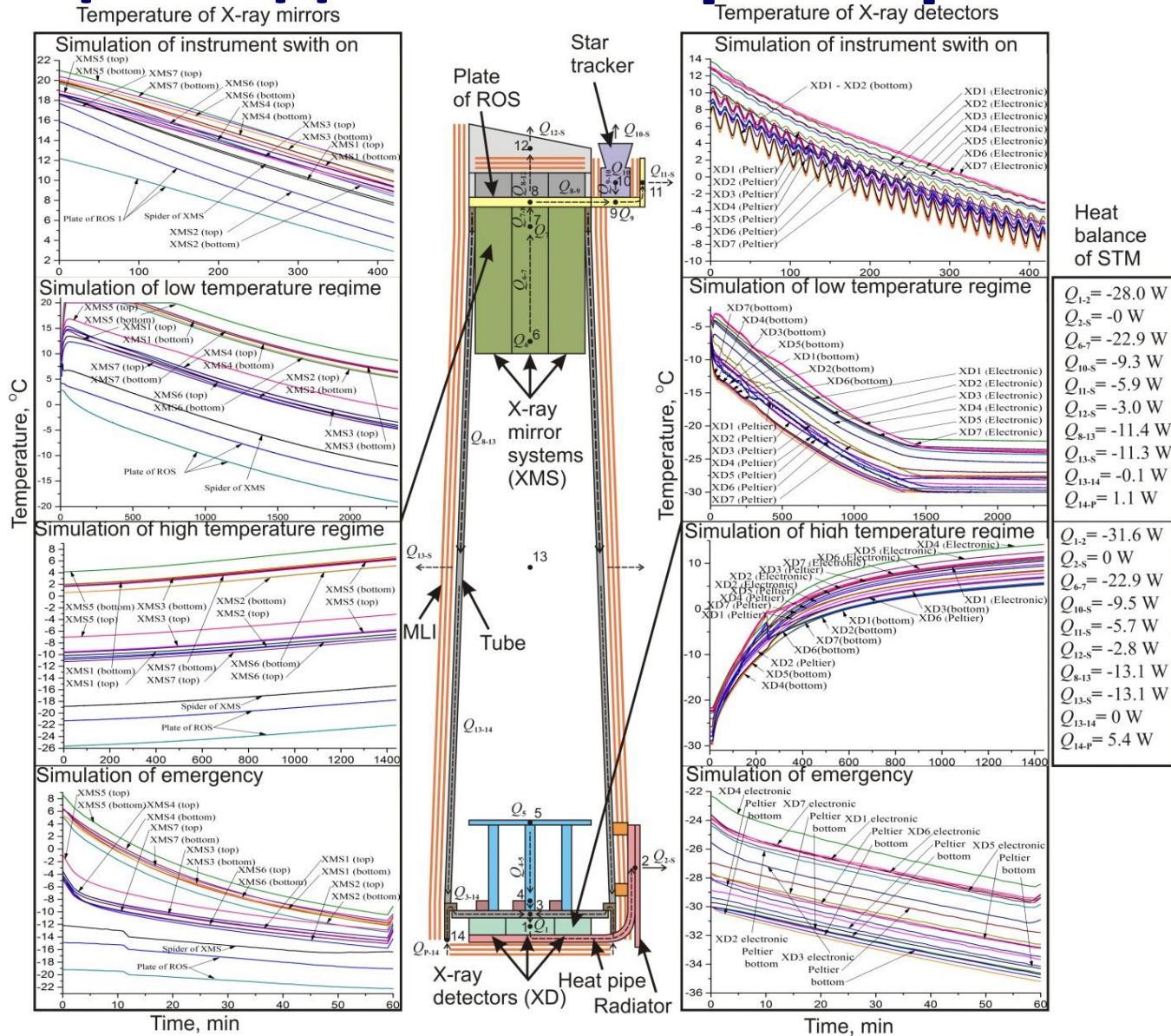


Экспериментально-аналитический метод – экспериментальное подтверждение



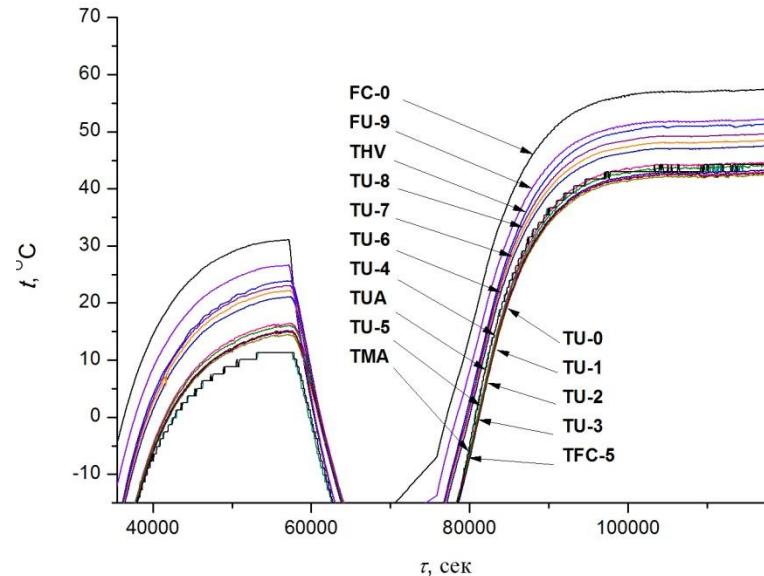
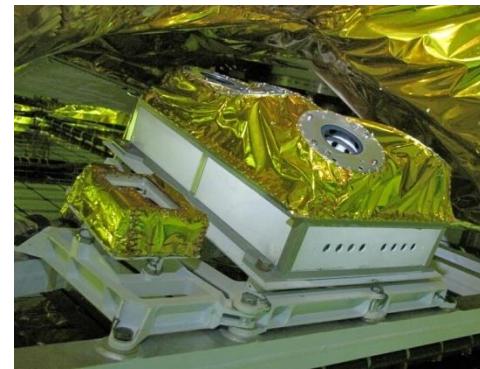
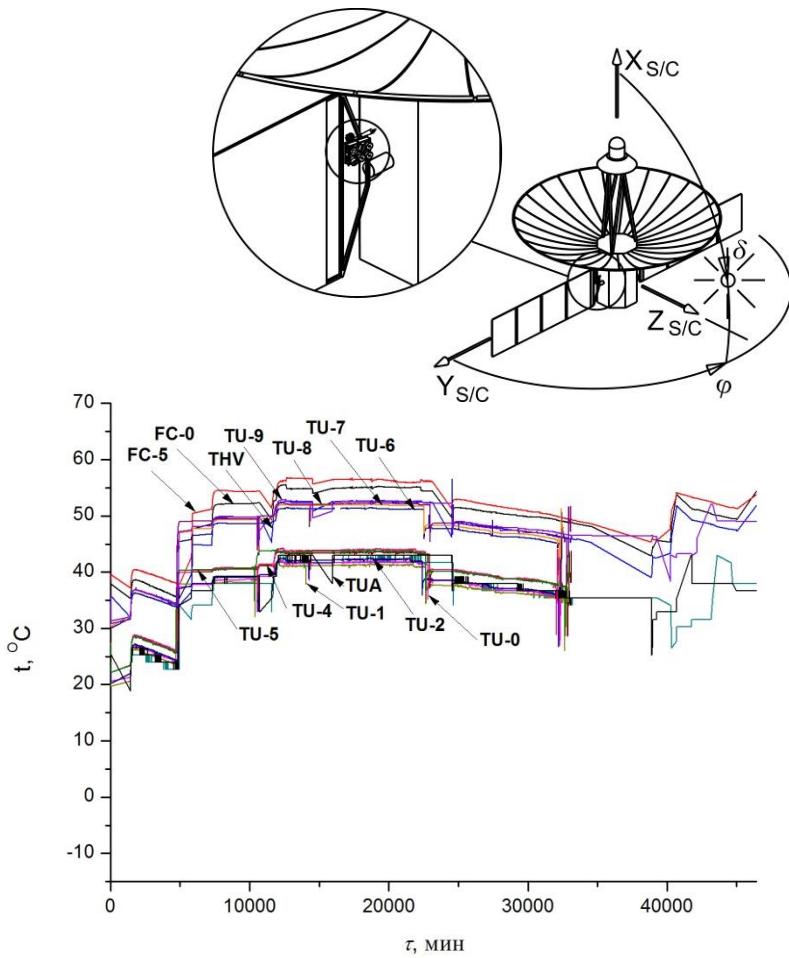
Использование метода в режиме коррекции отдельных параметров

НГМТЭ
ART-XC

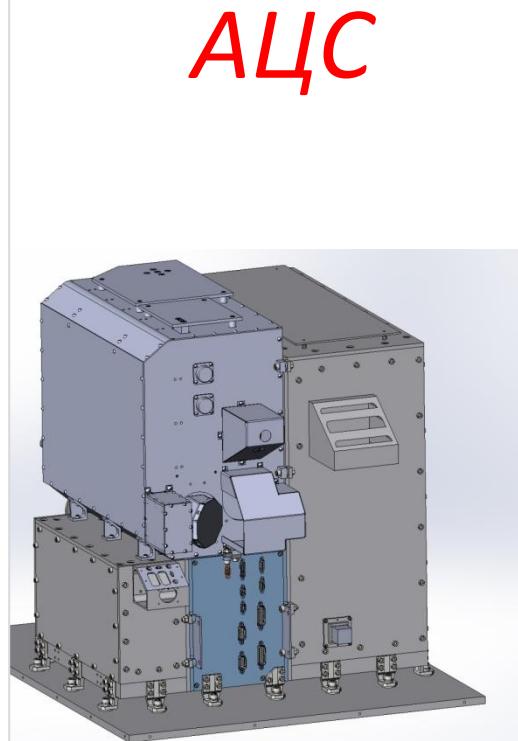
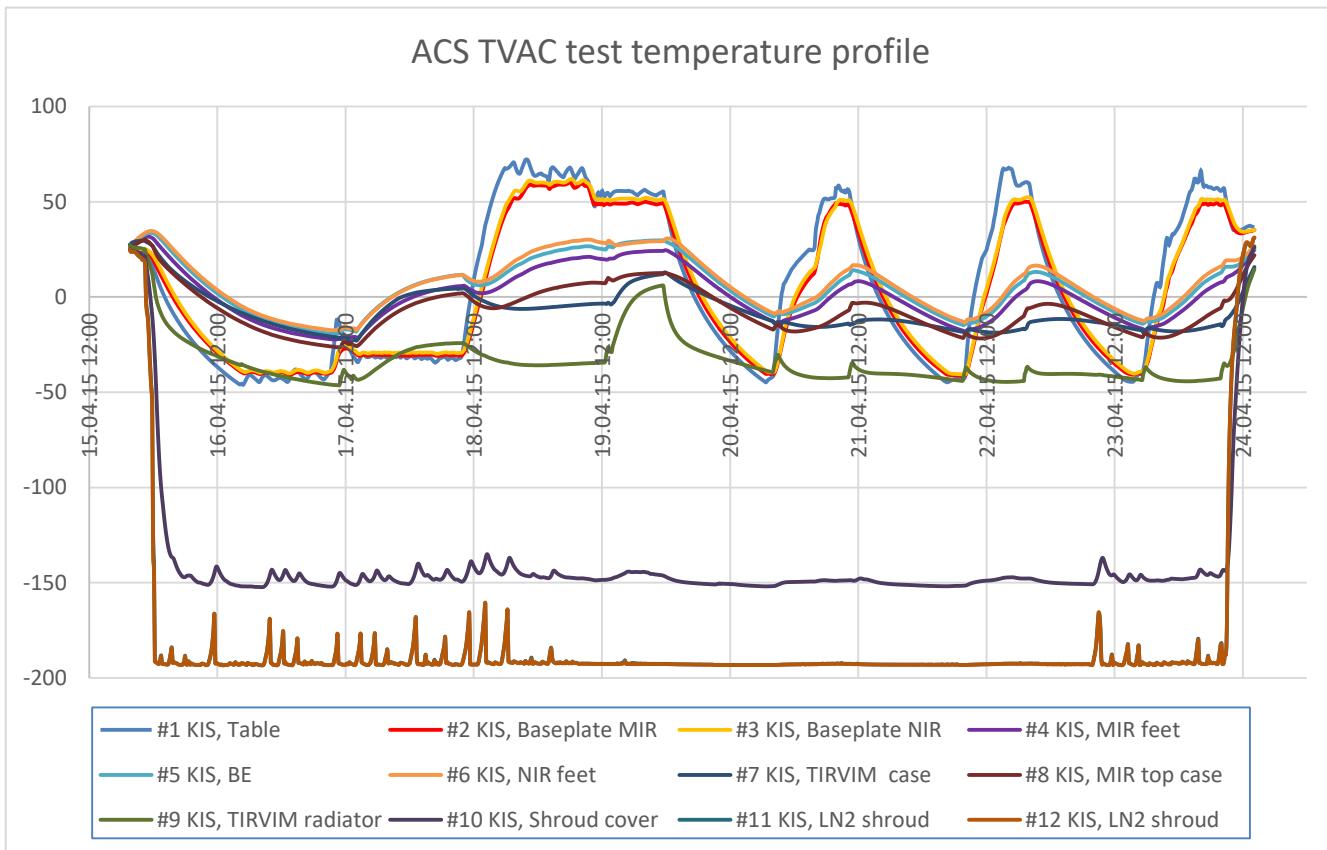


Использование метода в режиме коррекции отдельных параметров

БМСВ (СПЕКТР-Р)



Использование метода в режиме коррекции отдельных параметров



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*