

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ANSYS FLUENT ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АЭРОФИЗИКИ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Д.Р. Исмагилов, Г.Ф. Костин, Лепихов А.В.

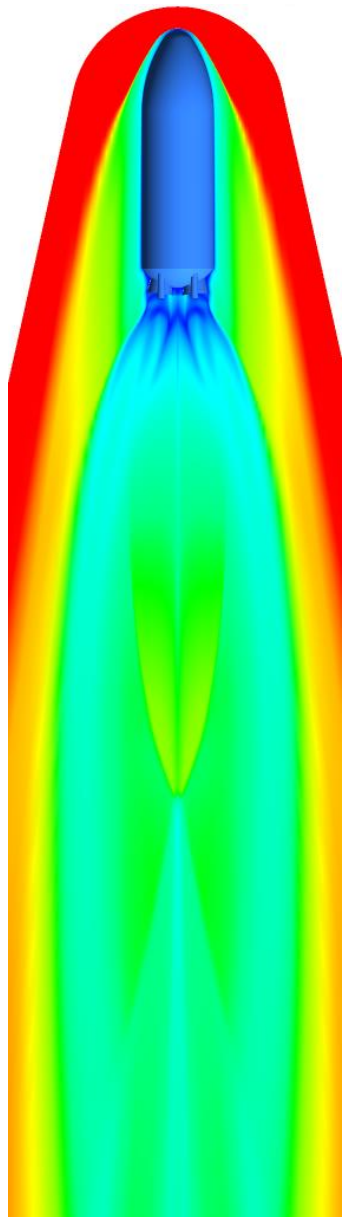
*Отдел теплообмена и аэрогидродинамики
государственного ракетного центра им. В.П. Макеева*

Докладчик:

Лепихов Андрей Валерьевич

Двадцатая Международная конференция по Вычислительной
механике и современным прикладным программным системам
(ВМСППС'2017)

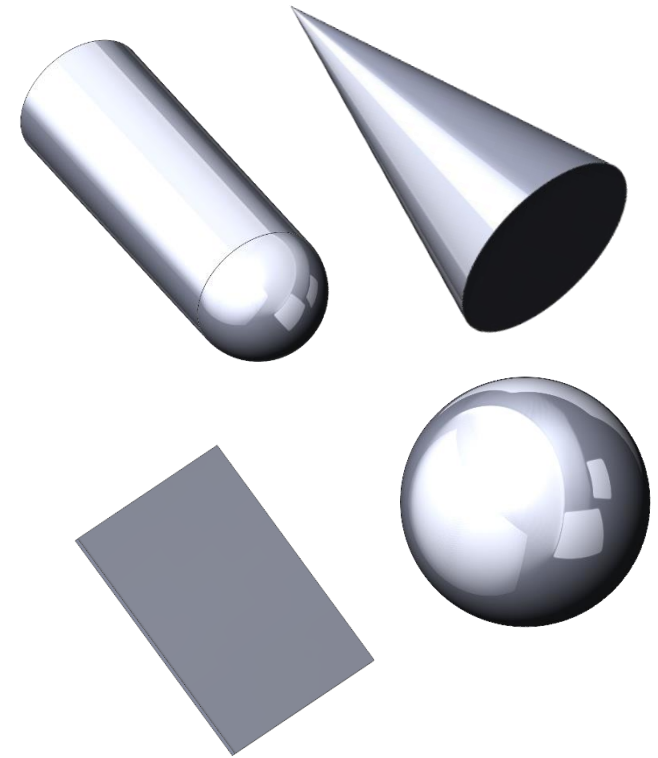
24 - 31 мая 2017 г., ОУЦ МАИ «Алушта»



Причины



- Геометрически сложные формы
- Наличие отрывных зон
- Перенос наземного эксперимента на условия натурного эксперимента
- Обработка летных экспериментов
- Незученные физические эффекты



Моделирование летных условий

Условия:

$$M_{\infty} = 6 - 30$$

$$Re_{\infty} = 1e5 - 1e8$$

$$I0_{\infty} = 1.6 - 30 \text{ МДж/кг}$$

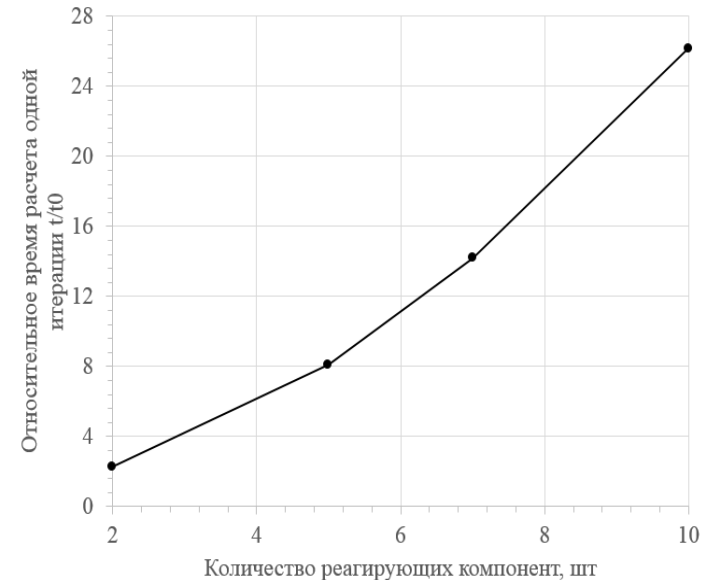
Модели:

- Равновесное течение
- Неравновесное течение
- Изменение внешнего контура ЛА
- Вдув продуктов разрушения теплозащитного покрытия в пограничный слой

Модель равновесного течения



- Поток моделируется одним компонентом
- Газодинамические и термодинамические параметры газа зависят от давления и температуры
- Базовые свойства газа задаются в табличном виде*



Зависимость времени расчета модельной CFD-задачи от количества реагирующих компонент. t_0 – время расчета одной итерации для задачи с одним эффективным компонентом

*Gupta R.N., Lee K-P., Thompson R.A., Yos J.M. Calculations and Curve Fits of Thermodynamic and Transport Properties for Equilibrium Air to 30 000 K // NASA Reference Publication 1260, October 1991.

Модель равновесного течения

(продолжение)



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho H + p)) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T + (\bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h$$

Замыкание системы уравнений:

$$p = \rho R T \cdot Z(p, T) \quad H(p, T) = \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad s = \frac{R_{eq}}{\gamma_{eq} - 1} \cdot \log \left(\frac{p}{\rho^{\gamma_{eq}}} \right)$$

$$C_p = F_1(p, T)$$

$$\mu = F_2(p, T)$$

$$\lambda_{eff} = F_3(p, T)$$

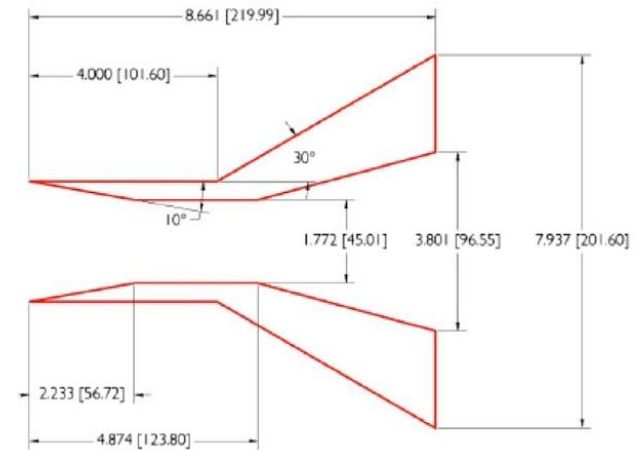
$$\frac{\partial H}{\partial T} = \frac{H(p, T + \Delta T) - H(p, T - \Delta T)}{2\Delta T}$$

$$\frac{\partial H}{\partial p} = \frac{H(p + \Delta p, T) - H(p - \Delta p, T)}{2\Delta p}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\rho}{Z} \cdot \left(\frac{1}{T} + \frac{dZ}{dT} \right) \quad \frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{1}{R_{eq} \cdot T} - \frac{\rho}{Z} \cdot \frac{dZ}{dp}$$

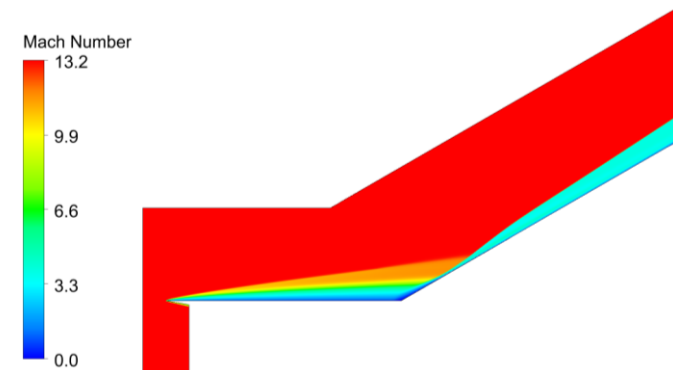
Проверка равновесной модели

(взаимодействие скачков уплотнения)



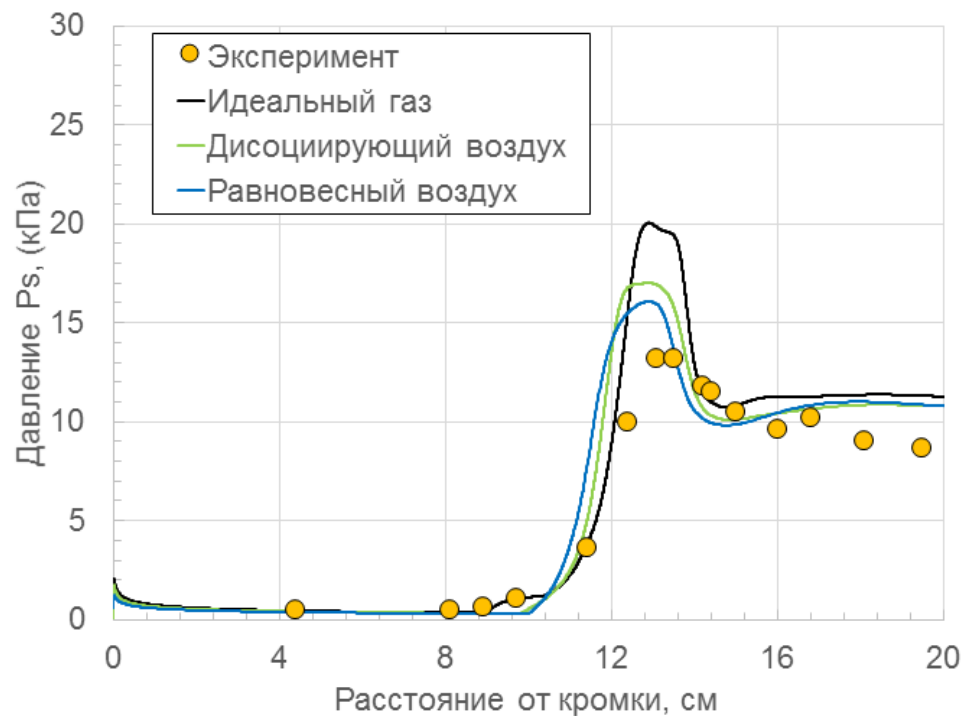
Условия эксперимента:

№ Эксп.	I_0 , МДж/кг	M_∞	P'_0 , кПа	V_∞ , м/с	T_∞ , К
1	5.07	11.3	5.9	3123	189
2	10.43	12.6	9.7	4497	318
4	15.54	11.5	64.0	5470	569
5	21.85	13.2	39.0	6515	618

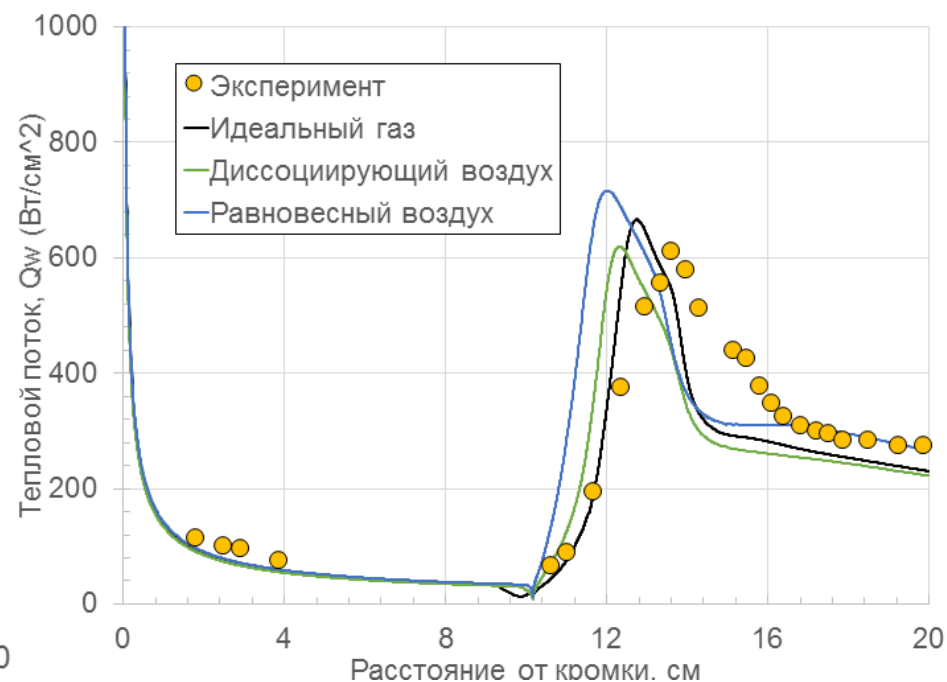


- Осесимметричная постановка
- Density-based solver
- 2 млн. ячеек (Hexa)

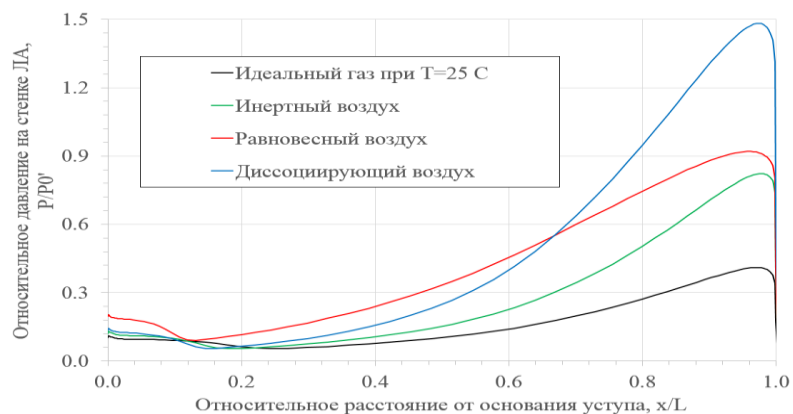
Сравнение с экспериментом



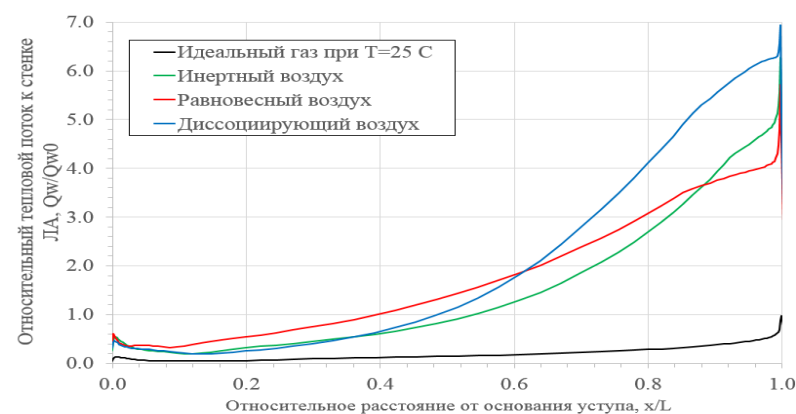
Давление



Тепловой поток

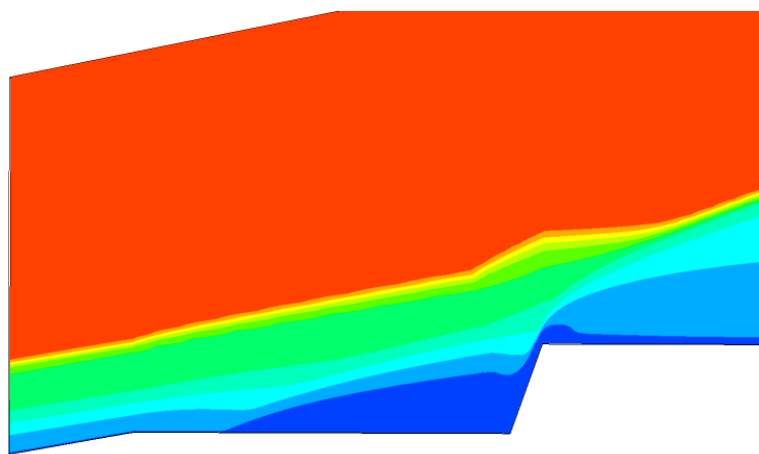


а

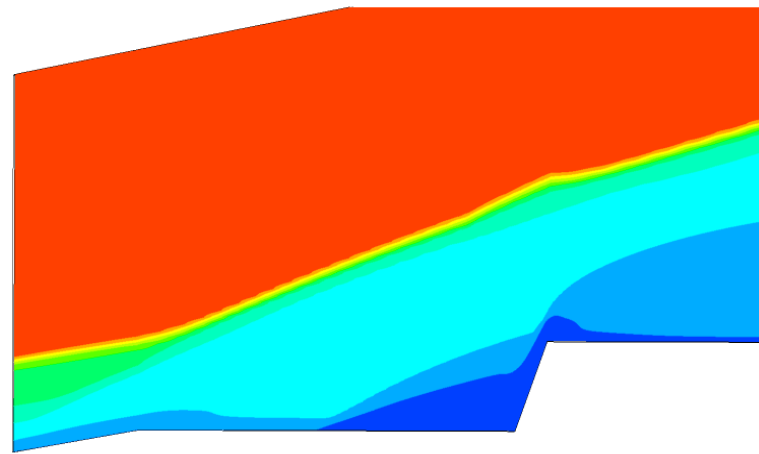


б

Распределение давления (а) и теплового потока (б) по наветренной поверхности уступа вдоль образующей, расположенной в плоскости симметрии уступа.



а



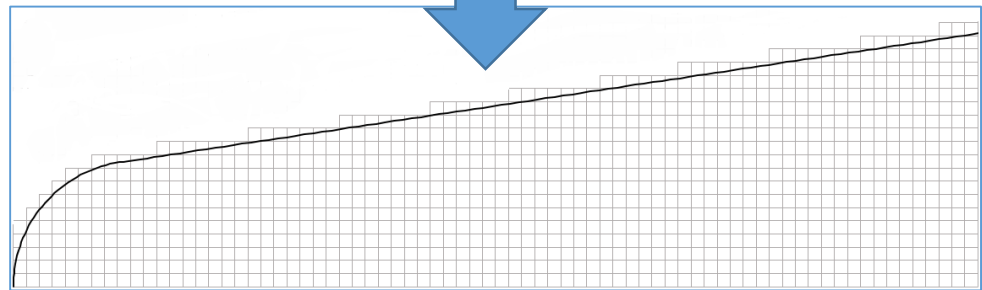
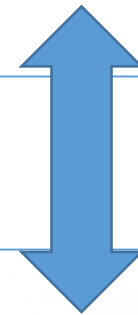
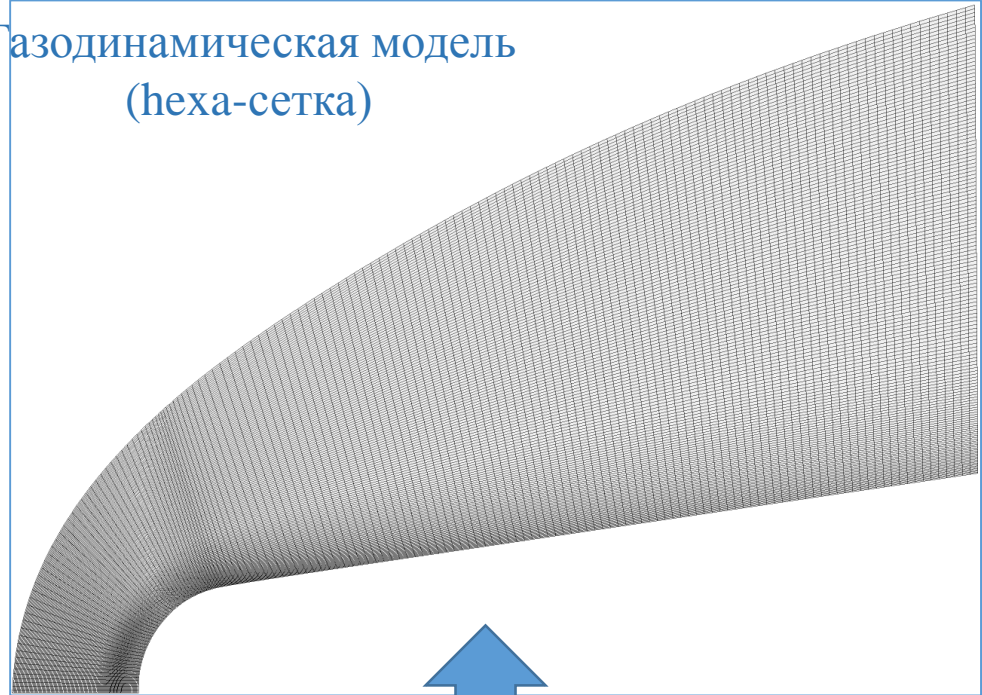
б

Распределение давления в окрестности уступа: а) химически активный воздух; б) модель равновесного воздуха

Подход

- Газодинамический расчет гиперзвуковых течений с моделированием равновесных и неравновесных процессов
- 1D и 2D -моделирование тепломассопереноса и пиролиза при термодеструкции материалов
- Инженерные методики для моделирования рецессии поверхности

Газодинамическая модель
(hexa-сетка)



Тепловая модель (декартова сетка)

ГД/ТР Сопряжение

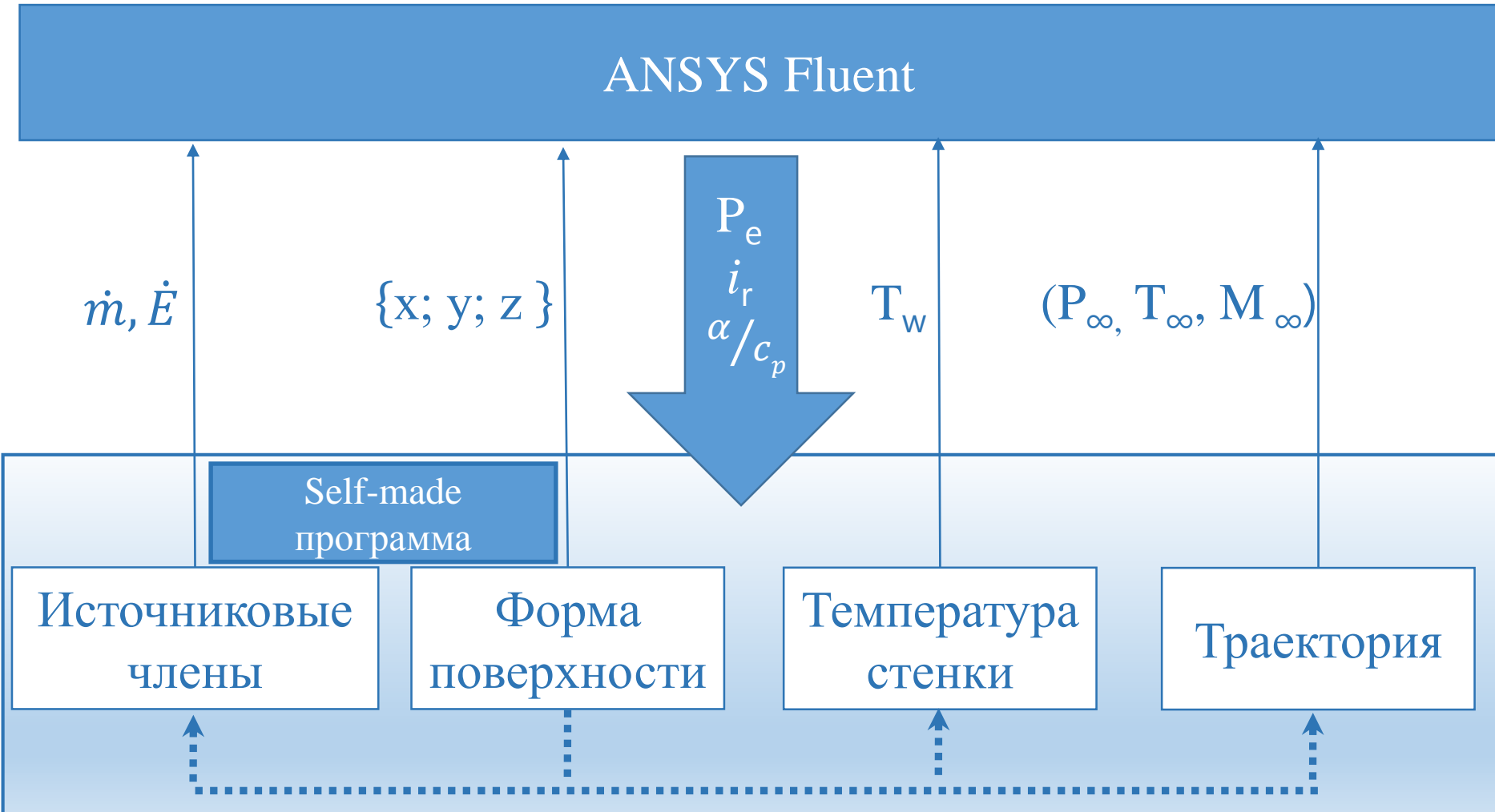


Схема программы сквозного траекторного расчета

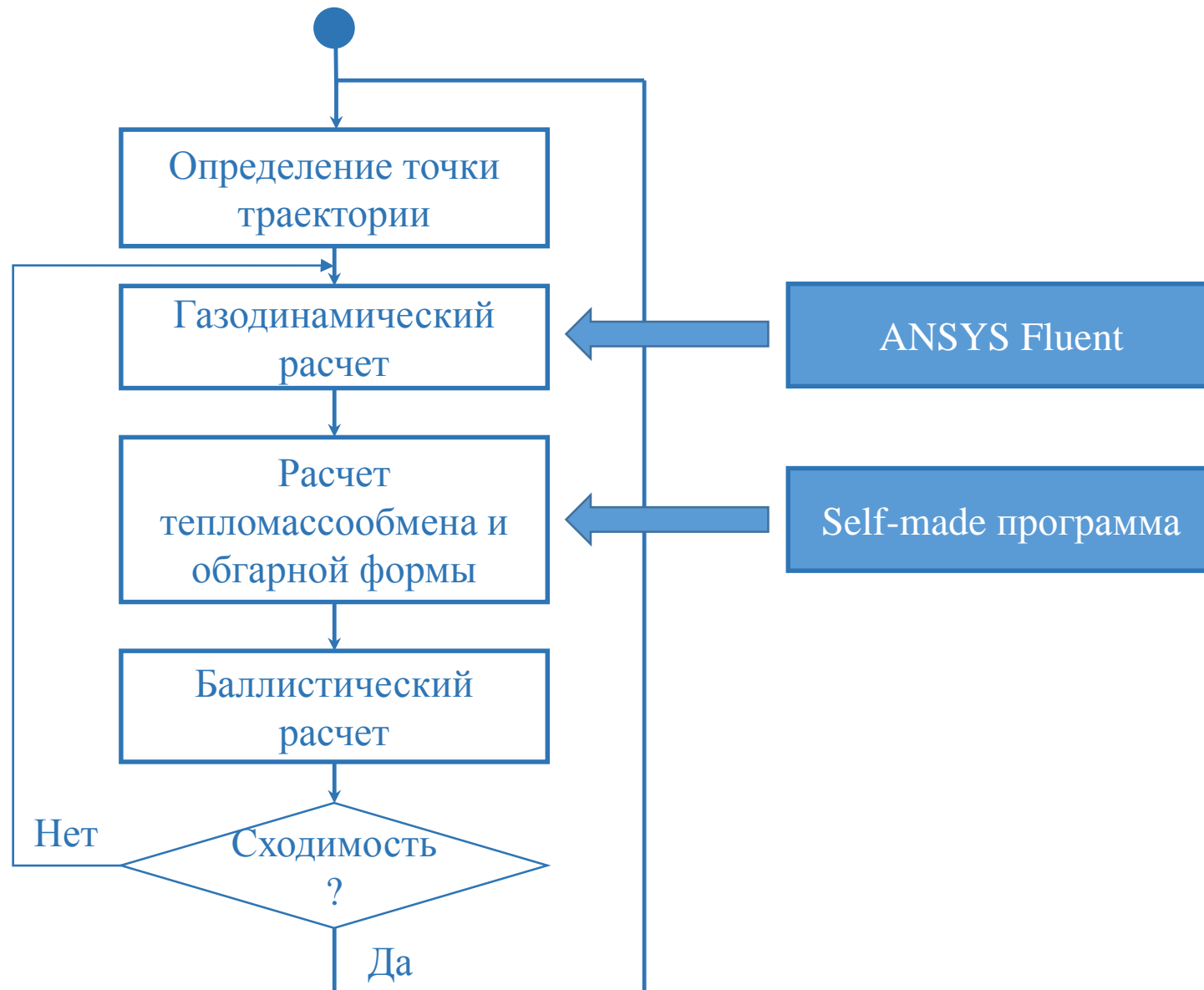
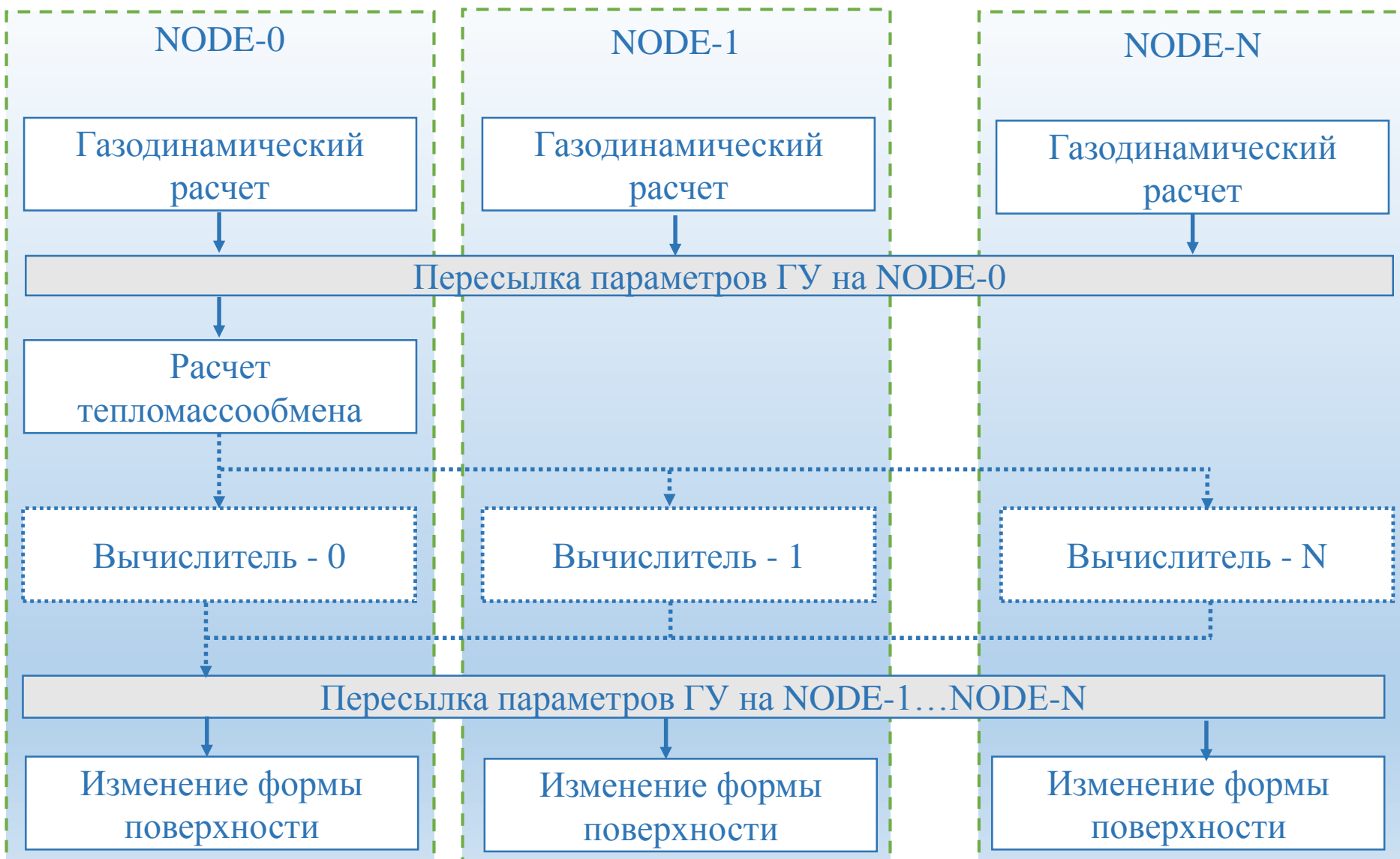


Схема параллельного выполнения одной итерации

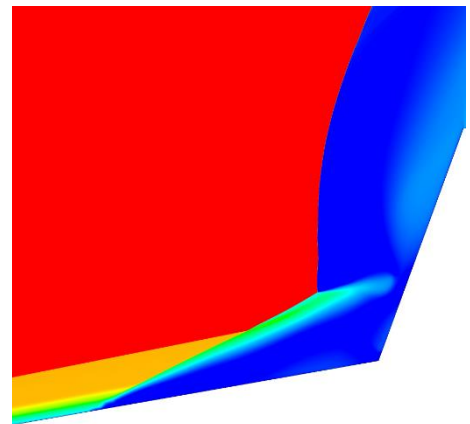
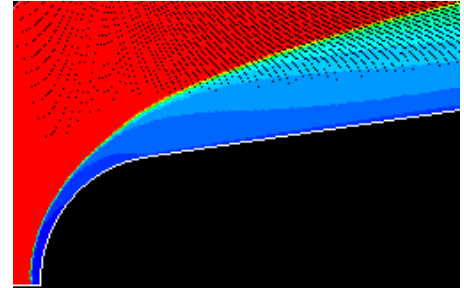


Термически неравновесные течения

(мотивация)



- Малые кромки и притупления $R < 40$ мм в разреженных слоях атмосферы ($H > 30$ км)
- Взаимодействие ударных волн на элементах управления ($M > 20$, $H > 30$ км)
- Радиосвязь и радиолокация в гиперзвуковом потоке



Реализация неравновесной модели

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(\lambda_{eff} \nabla T + (\bar{\vec{t}}_{eff} \cdot \vec{v}) - \sum_i h_i \vec{J}_i \right) - \sum_i \frac{h_i^0}{M_w^i} R_i + \mathbf{S}_h$$

$$\mathbf{S}_h = -\dot{e}_{v,s}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(Y_s e_{v,s}) + \nabla \cdot (Y_s \rho \vec{v} e_{v,s} + \mu_s \nabla e_{v,s}) = -\nabla \cdot (e_{v,s} \vec{J}_s) + \dot{e}_{v,s}$$

$$\dot{e}_{v,s} = \rho_{i(s)} \frac{e_{v,s}^0 - e_{v,s}}{\tau_s}$$

$$T_{v,s} = \frac{\theta_s}{\ln \left(\frac{R_{i(s)} \theta_s}{e_{v,s}} + 1 \right)}$$

S	Θ_s, K
N ₂	3396
O ₂	2275
NO	2742

Реализация неравновесной модели

(продолжение)



Расчет $\dot{e}_{v,s}$

$$\tau_s = \tau_{VT} + \tau_c$$

$$\tau_s = \exp(a(T^{-1/3} - b) - 18.42)/p$$

$$b = 0.015\mu^{0.25}$$

$$a = 0.00116\mu^{0.5}\theta^{1.333}$$

$$\tau_c = \frac{1}{N\sigma_v\sqrt{8kT/\pi M_w}}$$

$$\sigma_v = \sigma'_v(50000/T)^2$$

$$e_{v,s}^0 = \frac{R_{i(s)}\theta_s}{\exp(\theta_s/T_{tr}) - 1}$$

$$R_{i(s)} = R_0/M_i(s)$$

Химические реакции

$N_2, O_2, NO, N, O, NO^+, e^-$

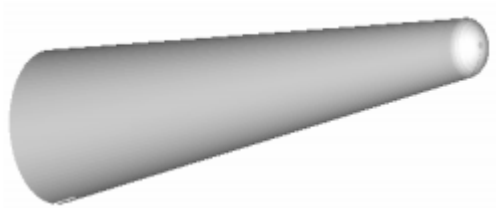
Кинетическая схема диссоциации воздуха. $k_f = A \cdot T^B \cdot e^{-E/RT}$,

$$T = \sqrt{T_{tr} \cdot T_v}$$

№ п/п	Реакция	A	B	E
1	$O_2 + M \rightleftharpoons 2O + M$	2.5005E+13	-0.5	4.9365e+08
2	$N_2 + O \rightleftharpoons NO + N$	6.8027E+10	0.0	3.1395e+08
3	$NO + O \rightleftharpoons O_2 + N$	3.1999E+06	1.0	1.6365e+08
4	$N_2 + M \rightleftharpoons 2N + M$	2.0004E+18	-1.5	9.4177e+08
5	$NO + M \rightleftharpoons N + O + M$	5.5042E+17	-1.5	6.2782e+08
6	$N + O \rightleftharpoons NO^+ + e^-$	6.3989e+17	0.5	2.6935e+08

Примечание: Эффективность M составляет 2.5 для компонента N_2 , 16 для H_2O и 1 для остальных компонент. Размерность принята в джоулях, молях* 10^{-3} , м³, секундах.

Тестирование: Модель «ELECTRE»



$R=35$ мм

$\Theta=4.6^\circ$

$L=400$ мм

$V_\infty = 5919$ м/с

$P_\infty = 430$ Па

$T_\infty = 790$ К

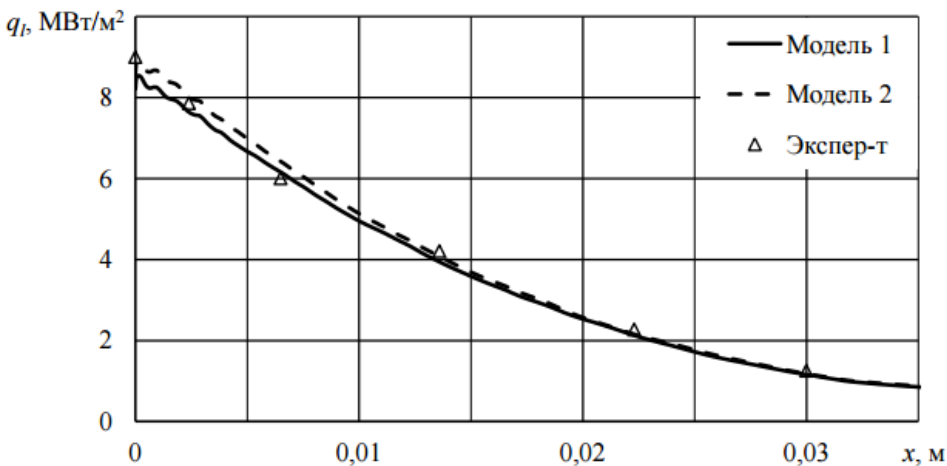


Рис. 2. Распределение удельного ламинарного теплового потока по сферическому притуплению аппарата Electre

(с учетом термической и химической неравновесностей):

Модель 1 - 7 компонентов смеси и 6 хим. реакций;

Модель 2 - 11 компонентов смеси и 15 хим. реакций.

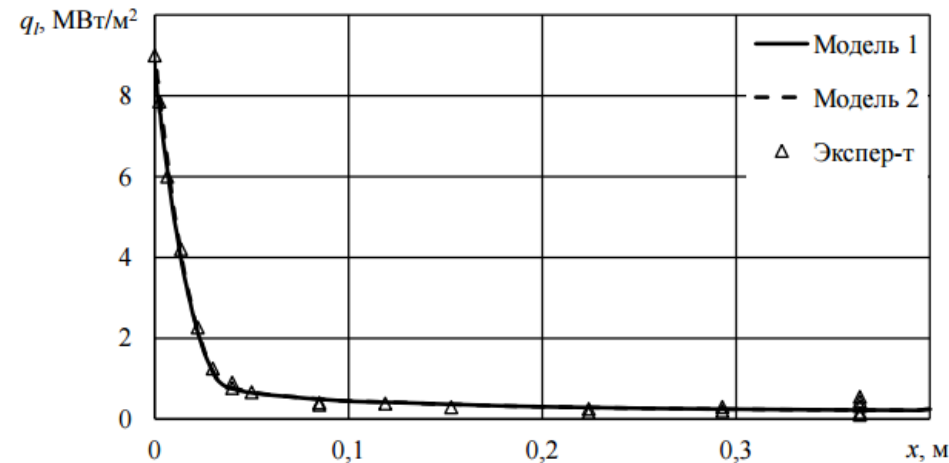


Рис. 1. Распределение удельного ламинарного теплового потока по всей поверхности тела с формой аппарата Electre

(с учетом термической и химической неравновесностей):

Модель 1 - 7 компонентов смеси и 6 хим. реакций;

Модель 2 - 11 компонентов смеси и 15 хим. реакций.

Заключение



- Выполнена реализация модели равновесного воздуха для диапазона температур до 30000 К и давлений - до 100 атм.
<https://drive.google.com/file/d/0B3ZrCnpdlHYxaFVBMW5WenRXbkE/view?usp=sharing>
- Разработана модель абляции поверхности ЛА в высокоэнтальпийном потоке
<https://drive.google.com/file/d/0B3ZrCnpdlHYxMW01dVc3a1o0U2c/view?usp=sharing>
- Реализована модель термически неравновесного воздуха (11 компонент, вибрационные моды для компонентов N_2 , O_2 , NO)
- Выполнено тестирование моделей, показана адекватность получаемых результатов экспериментальным данным

Спасибо за
внимание!