

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ТС3-1, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ONERA (ФРАНЦИЯ) И ИНСТИТУТОМ МЕХАНИКИ МГУ (РОССИЯ)

В.Громов*, В.Сахаров* и О.Rousaund**

*Институт механики МГУ, 1 Мичуринский проспект, 119192 Москва, Россия,

gromov@imec.msu.ru sakharov@imec.msu.ru

** ONERA, Department Modeling of Aerodynamics and Energetics, 2 Avenue Edouard Belin,

31055 Toulouse, France, rouzaud@oncert.fr

Проведен сравнительный анализ полей течений, конвективных и радиационных тепловых потоков к поверхности модели Марсианского спускаемого аппарата, рассчитанных с использованием различных сеток для условий ТС3-1 [1]. Получена сложная топология течения с образованием нескольких отрывных зон с подветренной стороны модели в расчетах как одноблочной, так и многоблочных сетках. Конвективные тепловые потоки вдоль поверхности в расчетах для всех типов сеток, совпадают с высокой точностью. Радиационные тепловые потоки в LTE приближении хорошо совпадают на наветренной стороне модели для всех расчетных сеток и использованных радиационных моделей. На подветренной стороне совпадение радиационных тепловых потоков наблюдается для сеток имеющих одинаковые протяженности в продольном направлении.

ANALYSIS OF THE RESULTS FOR TC3-1 PRESENTED BY ONERA AND INSTITUTE OF MECHANICS MSU

The results of the mandatory case TC3-1 [1] involving flow field and radiation computations are presented and analyzed. Flow field and RHT computations over the whole body using the mono-domain and multi-block grids were performed. All calculations gave complicated flow topology over the whole body both on multi-domain and mono-domain grids. The convective wall heat flux distributions are close for the various grids used. The after-body wall radiative heat fluxes are close for grids with the same longitudinal dimensions.

1. Введение

Представлены и проанализированы результаты численных расчетов, выполненных в рамках проекта ИНТАС №.5204 для условий ТС3-1 [1]. В Институте механики МГУ выполнены газодинамические расчеты (CFD) около полной конфигурации и определены радиационные тепловые потоки (RHT) для условий ТС3-1 на одноблочной сетке G-OB-TC3-1, многоблочной сетке G-MB-TC3-1 и многоблочной сетке, разработанной в Институте механики МГУ. Расчеты проведены также около лобовой части тела на одноблочной сетке G-FS-TC3-1. Расчетные сетки G-OB-TC3-1, G-MB-TC3-1 и G-FS-TC3-1 позаимствованы с сайта Workshop 2003 [1], где приведены условия для ТС3-1. В ONERA (Франция) проведены расчеты на одноблочной сетке G-OB-TC3-1 и представлены аналогичные результаты. Все проведенные расчеты сведены в Таблицу 1.

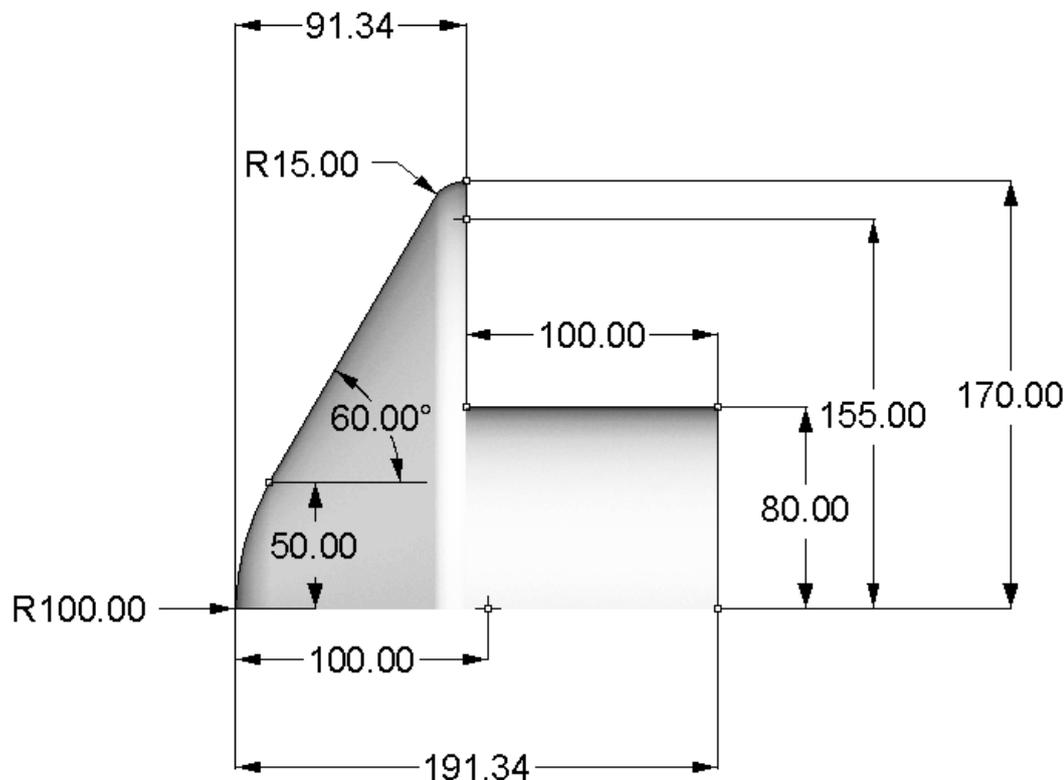
Сетка/Организация	НИИМех	ONERA
G-OB-TC3-1	CFD + RHT	CFD + RHT
G-FS-TC3-1	CFD + RHT	CFD
G-MB-TC3-1	CFD + RHT	
НИИМех	CFD + RHT	
CFD solver	HIGHTEMP (НИИМех)	CELHYO2D
RHT solver + оптические модели	HIGHTEMP + ABSORB_AGM (ИПМех)	ASTRE + EM2C model

Таблица 1. Представленные результаты расчетов для ТС3-1

2. Описание параметров ТС3-1

2.1. Модель Марсианского космического аппарата

Наветренная часть осесимметричной модели аппарата имеет форму затупленного по сфере конуса, к которой с подветренной стороны примыкает круговой цилиндр. На фиг.1 дан чертеж модели, где цифры - размеры в сантиметрах.



Фиг. 1: Форма модели аппарата (размеры в см.)

2.2. Модель Марсианской атмосферы

Марсианская атмосфера по условиям ТС3-1 предполагалась состоящей только из CO_2 (модель атмосферы ATM-SPECIES-1 [1]).

2.3. Условия в набегающем потоке

Плотность – $2.933 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3$;

Скорость – 5223 м/с;

Температура – 140 К.

2.4. Газофазная модель

2.4.1. Химическая модель

Условиями ТС3-1 предписано использование модифицированной 5-компонентной (O , C , O_2 , CO , CO_2) химической модели, предложенной Парком в 1994 году. Константы скоростей прямых и обратных реакций задаются в Аррениусовском виде:

константа скорости прямой реакции $K_f(T) = A_f T^{b_f} \exp(-E_f / T)$ и

константа скорости обратной реакции $K_r(T) = A_r T^{b_r} \exp(-E_r / T)$.

В модели учитывалось протекание следующих 18 химических реакций:

$$K_f (m^3 \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1}), \quad K_r (m^3 \cdot mol^{-1} \cdot s^{-1} \text{ or } m^6 \cdot mol^{-1} \cdot s^{-2})$$

	A_f	b_f	E_f	A_r	b_r	E_r
1) CO ₂ + O ₂ = CO + O + O ₂	6.90e15	-1.5	63275	1.14e05	-0.75	535.
2) CO ₂ + O = CO + O + O	1.38e16	-1.5	63275	2.28e05	-0.75	535.
3) CO ₂ + C = CO + O + C	1.38e16	-1.5	63275	2.28e05	-0.75	535.
4) CO ₂ + CO = CO + CO + O	6.90e15	-1.5	63275	1.14e05	-0.75	535.
5) CO ₂ + CO ₂ = CO + O + CO ₂	6.90e15	-1.5	63275	1.14e05	-0.75	535.
6) CO + O ₂ = C + O + O ₂	2.30e14	-1.0	129000	5.13e06	-1.0	0.
7) CO + O = C + O + O	3.40e14	-1.0	129000	7.59e06	-1.0	0.
8) CO + C = C + O + C	3.40e14	-1.0	129000	7.59e06	-1.0	0.0
9) CO + CO = C + O + CO	2.30e14	-1.0	129000	5.13e06	-1.0	0.0
10) CO + CO ₂ = C + O + CO ₂ .	2.30e14	-1.0	129000	5.13e06	-1.0	0.0
11) O ₂ + C = O + O + C	1.00e16	-1.5	59500	1.0e07	-1.0	0.0
12) O ₂ + CO = O + O + CO	2.00e15	-1.5	59500	2.0e06	-1.0	0.0
13) O ₂ + CO ₂ = O + O + CO ₂	2.00e15	-1.5	59500	2.0e06	-1.0	0.0
14) CO + CO = CO ₂ + C	2.33e03	0.5	65710	4.6e06	-0.25	0.0
15) CO + O = O ₂ + C	3.90e07	-0.18	69200	1.34e08	-0.43	0.0
16) CO ₂ + O = O ₂ + CO	2.10e07	0.0	27800	4.11e04	0.5	23800
17) O ₂ + O ₂ = O + O + O ₂	2.00e15	-1.5	59500	2.0e06	-1.0	0.0
18) O ₂ + O = O + O + O	1.00e16	-1.5	59500	1.0e07	-1.0	0.0

2.4.2. Термодинамика

Для расчета термодинамических функций использовалась модель жесткого ротатора – гармонического осциллятора. Значения характеристических колебательных (T_V) и вращательных (T_R) температур молекул приведены в следующей таблице:

Молекула	T_V, K	T_R, K
CO ₂	1890, 954(2), 3360	0.56
CO	3121	2.78
O ₂	2270	2.08

Энтальпии образования компонентов представлены ниже в таблице:

Компонент	$H_0^f (Дж / кг)$
CO ₂	-8.94368e6
CO	0.
O ₂	-3.9475e6
C	5.97225e7
O	1.54057e7

2.4.3. Транспортные свойства

Для расчета вязкости смеси использовалась формула [1] (Armaly&Sutton):

$$\mu_{mixture} = \sum_{s=1}^{ns} \frac{\mu_s}{1 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq s}}^{ns} \frac{X_k}{X_s} \left(F_{sk} + \sqrt{\frac{\mu_s}{\mu_k}} \left(\frac{\hat{M}_k}{\hat{M}_s} \right)^{1/4} B_{sk} \right)^2 \left(\frac{\hat{M}_s}{\hat{M}_s + \hat{M}_k} \right) \left(\frac{5}{3A_{sk}^*} + \frac{\hat{M}_k}{\hat{M}_s} \right)} \sqrt{8 \left(1 + \frac{\hat{M}_s}{\hat{M}_k} \right)}$$

где $A_{sk} = 1.25$, $B_{sk} = 0.78$, $F_{sk} = 1$.

Следующие формулы приведены в [1] для расчета вязкости чистых газов (Blottner):

$$\mu_s = 0.1 \exp \left[\left(A_s^\mu \ln T + B_s^\mu \right) \ln T + C_s^\mu \right]$$

Значения коэффициентов A_s^μ , B_s^μ , C_s^μ представлены в таблице:

Частицы	A_s^μ	B_s^μ	C_s^μ
O2	0.0449290	-0.0826158	-9.2019475
CO	-0.014044	0.887198	-13.269815
CO2	-0.026654	1.107305	-14.291274
O	0.0436378	-0.0335511	-9.5767430
C	-0.007140	0.768602	-12.956246

Коэффициент теплопроводности вычисляется в предположении постоянного числа Прандтля для всей области течения:

$$Pr = \frac{\mu_{mix} C_p}{\lambda_{mix}} = 0.66.$$

Для вычисления массовых диффузионных потоков компонентов использовался закон бинарной диффузии Фика:

$$\vec{J}_s = -\rho D \frac{\partial c_s}{\partial \vec{r}}.$$

Число Льюиса полагалось постоянным во всей области течения:

$$Le = \frac{\rho D C_p}{\lambda_{mix}} = 1.$$

2.5. Модель взаимодействия газа с поверхностью

Поверхность тела считалась некаталитической. Температура поверхности задавалась: для лобовой части тела, вплоть до миделя, $T_{w-FHS} = 1500\text{K}$, и для оставшейся поверхности тела $T_{w-AFT} = 500\text{K}$.

3. CFD и РНТ расчеты

3.1. Расчетные сетки

CFD расчеты на основе уравнений Навье-Стокса и РНТ расчеты были выполнены на различных сетках, адаптированных к поверхности тела. Многоблочная сетка, построенная в НИИМех состоит из 8 блоков и содержит 37740 расчетных узлов (фиг.2). Кроме того, сетка адаптирована для расчета течения в следе за моделью и в области головного скачка. Для достижения последнего координатная линия одного из семейств в процессе расчета совмещается с линией, расположенной в области головной ударной волны. На этой линии отношение плотностей ρ/ρ_∞ - заданная величина (обычно - около 4-5).

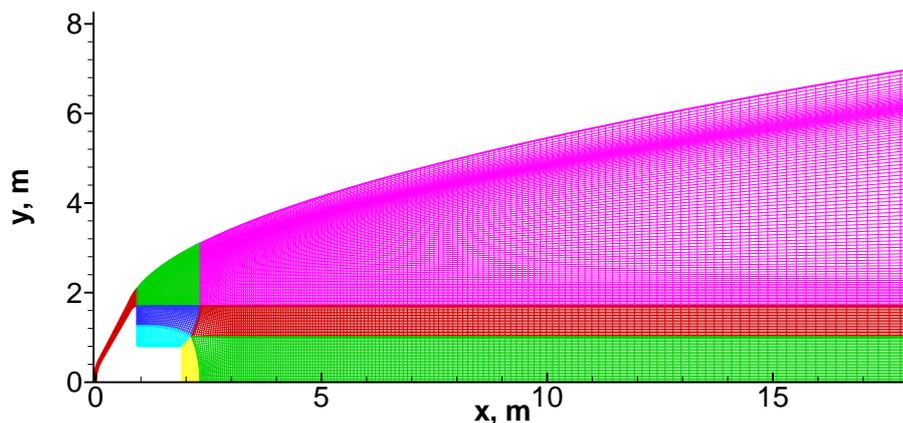
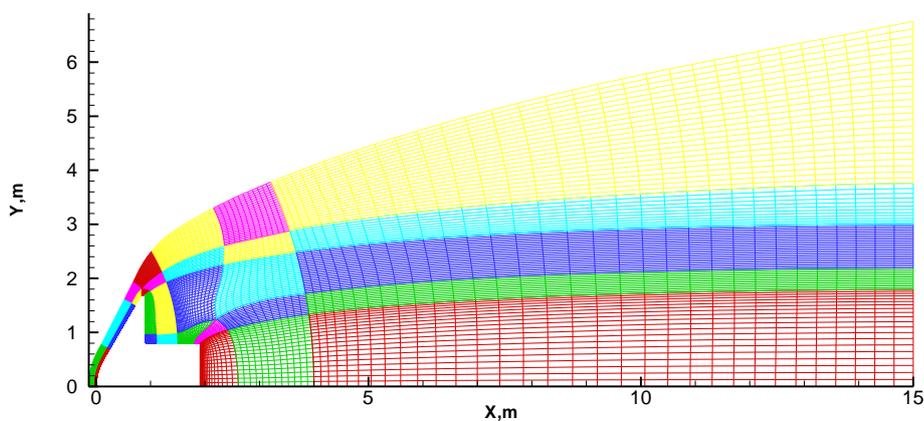


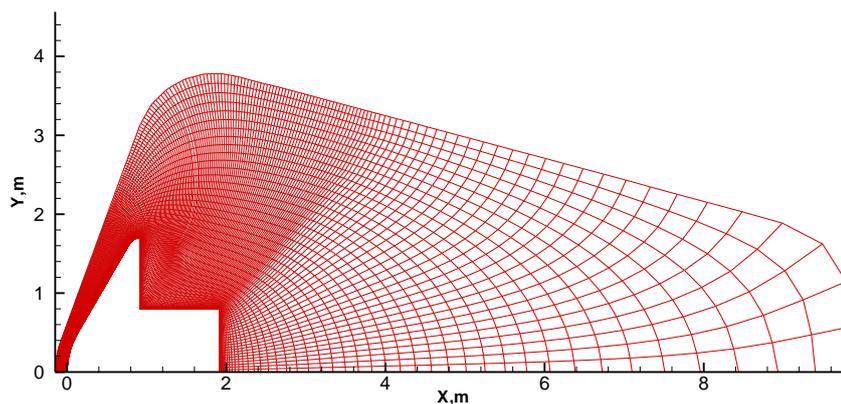
Fig.2: Многоблочная сетка НИИМех

Многоблочная сетка G-MB-TC3-1 (R-Tech) состоит из 29 блоков и содержит 24336 расчетных узлов (фиг.3). Эта сетка адаптирована к расчету течения в следе за моделью, но имеет большее разрежение в области дальнего следа по сравнению с сеткой, разработанной в НИИМех.



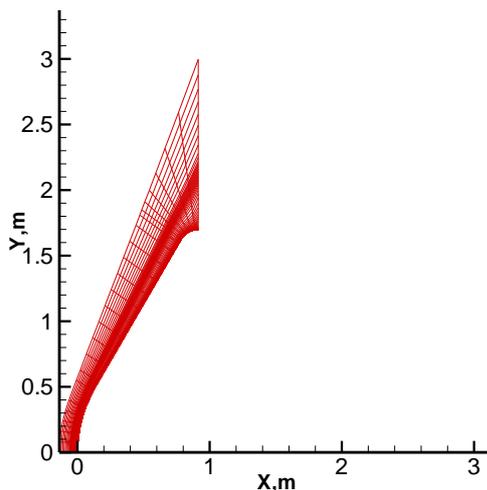
Фиг.3: Многоблочная сетка G-MB-TC3-1

Одноблочная расчетная сетка G-OB-TC3-1 (ONERA) размерностью 192x100 узлов изображена на фиг.4. Сетка имеет достаточное сгущение в области головного скачка.



Фиг.4: Одноблочная сетка G-OB-TC3-1

Одноблочная расчетная сетка G-FS-TC3-1 используется для расчетов течения и радиационных тепловых потоков с наветренной стороны модели и содержит 24x86 узлов (фиг.5). Это сетка имеет избыточное сгущение сеточных линий к поверхности тела.



Фиг.5: Одноблочная сетка G-FS-TC3-1

3.2. Методика расчета обтекания тел вязким газом, разработанная в НИИМех

Газодинамические расчеты выполнялись в Институте механики МГУ с использованием технологии численного моделирования высокотемпературных течений газа (HIGHTEMP) [3]. Эта технология основана на комплексе программ численного интегрирования уравнений Навье-Стокса (НС), интегрированной с базами данных по термодинамическим, транспортным и термохимическим свойствам индивидуальных веществ, взаимодействующих со специальными кодами-генераторами классов моделей среды.

Решение уравнений НС реализовано для различных классов моделей среды, широко используемых в расчетах течений высокотемпературного газа: от совершенного газа до многотемпературных, многокомпонентных ионизированных газовых смесей. Неравновесные химические реакции, реакции ионизации, релаксация энергии внутренних степеней свободы могут быть включены в кинетическую модель и учтено их взаимодействие. Различные модели взаимодействия газа с поверхностью могут быть также включены в численную реализацию.

Уравнения Навье-Стокса решаются на одноблочных и многоблочных структурированных сетках. Для численного решения нестационарных уравнений Навье-Стокса применяется неявная разностная схема, построенная на основе метода конечного объема. Потоки массы импульса и энергии через границы расчетных ячеек разделяются на вязкую и невязкую составляющие. Невязкие потоки через границы вычисляются на основе точного решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва, определяемой граничными значениями параметров в соседних ячейках. Для нахождения последних используется неосциллирующее одномерное восполнение исходных физических переменных: давления, температуры, декартовых составляющих скорости и концентраций компонентов смеси внутри ячеек по соответствующим координатным направлениям. Вязкие потоки через внутренние границы ячеек вычисляются с помощью центральных разностей, а через границы, лежащие на поверхности тела, по односторонним трехточечным формулам.

Решение разностных уравнений находится с помощью двухслойной неявной итерационной схемы. В неявной части конечно-разностного оператора используются направленные разности в соответствии со знаками собственных значений матриц Якоби конвективных слагаемых. Система разностных уравнений записывается в виде, удобном

для применения итерационного процесса Гаусса-Зейделя по линиям, вдоль которых обращение неявного оператора проводится векторными трехточечными прогонками.

3.3. РНТ метод

Радиационный перенос тепла в цилиндрических координатах (x, y, ψ) описывается уравнением баланса переноса излучения для контрольного объема S с границей δS в меридиональной плоскости $(x, y, 0)$

$$\int_{\delta S} \vec{n} \cdot \vec{\Omega} I_{\omega} y ds = \int_S \kappa_{\omega} (\bar{I}_{\omega} - I_{\omega}) y dS + \sin \theta \int_S (\cos \varphi I_{\omega} + \sin \varphi \partial I_{\omega} / \partial \varphi) dS$$

где $I_{\omega}(x, y, \vec{\Omega})$ и $\bar{I}_{\omega}(x, y)$ - спектральные интенсивности излучения среды и абсолютно черного тела, κ_{ω} - спектральный коэффициент поглощения, $\vec{n} = (n_x, n_y)$ - вектор единичной внешней нормали к границе δS , $\vec{\Omega}$ - направление распространения излучения определяется следующим образом:

$$\vec{\Omega}(\theta, \varphi) = (\cos \theta, \sin \theta \cos \varphi) .$$

Здесь θ - полярный угол между осью ox и $\vec{\Omega}$, φ - азимутальный угол.

Метод конечного объема также применяется и для решения уравнения переноса излучения. Спектральная интенсивность $I_{\omega}(x, y, \vec{\Omega})$ считается кусочно-постоянной величиной на дискретных интервалах по спектру и углу $\vec{\Omega}$. Разностные уравнения конечного объема для определения величины I_{ω} (обозначим ее как I^n) записаны в форме баланса энергии для ячейки (i, j) :

$$f_{i+1/2, j}^n - f_{i-1/2, j}^n + f_{i, j+1/2}^n - f_{i, j-1/2}^n + \kappa_{i, j}^k [I_{i, j}^n - \bar{I}_{i, j}^k] y_{i, j} S_{i, j} - \sin \theta_m \left[\cos \varphi_n I_{i, j}^n + \sin \varphi_n \frac{\Delta_{\varphi} I_{i, j}^n}{\Delta \varphi} \right] S_{i, j} = 0;$$

$$\mathbf{n} = (k, m, n), \quad k = 1, \dots, K; \quad m = 1, \dots, 2M; \quad n = 0, \dots, N;$$

$$I^n = I_{\omega_k}(\vec{\Omega}_{m, n}), \quad \vec{\Omega}_{m, n} = (\cos \theta_m, \sin \theta_m \cos \varphi_n); \quad \bar{I}^k = \bar{I}_{\omega_k};$$

$$\omega_k = \omega_S + (k + 0.5) \Delta \omega, \quad \Delta \omega = (\omega_F - \omega_S) / K;$$

$$\kappa^k = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \kappa_{\omega_l}^k, \quad \omega_l = \omega_S + (k-1) \Delta \omega + (l-0.5) \Delta \omega / L, \quad l = 1, \dots, L;$$

$$\sin \theta_m = 1 / (M \Delta_m \theta), \quad \Delta_m \theta = \arccos(1 - m / M) - \arccos(1 - (m-1) / M);$$

$$\cos \theta_m = 1 - (m - 0.5) / M, \quad \varphi_n = n \Delta \varphi, \quad \Delta \varphi = \pi / N.$$

Здесь k, m, n - номера интервалов по спектру и углам θ, φ соответственно; l - номер спектральной точки интервала $\Delta \omega$; $f_{i \pm 1/2, j}^n, f_{i, j \pm 1/2}^n$ - потоки I^n через соответствующие грани ячеек; $\Delta_{\varphi} I_{i, j}^n = I_{i, j}^{(k, m, n+1)} - I_{i, j}^{(k, m, n)}$. Радиационные потоки через грани ячеек рассчитываются с использованием аппроксимации против потока. Например,

$$f_{i+1/2, j}^n = (\bar{s}_{i+1/2, j} \vec{\Omega}_{m, n}) y_{i+1/2, j} I_{i+1/2, j}^n,$$

$$I_{i+1/2,j}^{\mathbf{n}} = \begin{cases} I_{i,j}^{\mathbf{n}} & \text{для } (\vec{n}_{i+1/2,j} \cdot \vec{\Omega}_{m,n}) \geq 0 \\ I_{i+1,j}^{\mathbf{n}} & \text{для } (\vec{n}_{i+1/2,j} \cdot \vec{\Omega}_{m,n}) < 0 \end{cases}$$

Здесь $\vec{s}_{i+1/2,j}$ векторная длина грани ячейки.

Для каждого набора $\mathbf{n} = (k, m, n)$ решение разностных *RHT*- уравнений осуществляется за несколько проходов ячеек в различных направлениях, начиная с границ расчетной области. Тепловые радиационные потоки к телу находятся суммированием спектральных радиационных потоков к поверхности тела для всех частотных и угловых интервалов

$$q_{w,i}^{rad} = -\frac{2\Delta\varphi\Delta\omega}{M} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{2M} \sum_{n=0}^N r_n I_{i,1}^{(k,m,n)}(\vec{n}_{i,1/2} \cdot \vec{\Omega}_{m,n}), \quad (\vec{n}_{i,1/2} \cdot \vec{\Omega}_{m,n}) < 0;$$

$$r_0 = r_N = 0.5; \quad r_n = 1, \quad n = 1, \dots, N - 1.$$

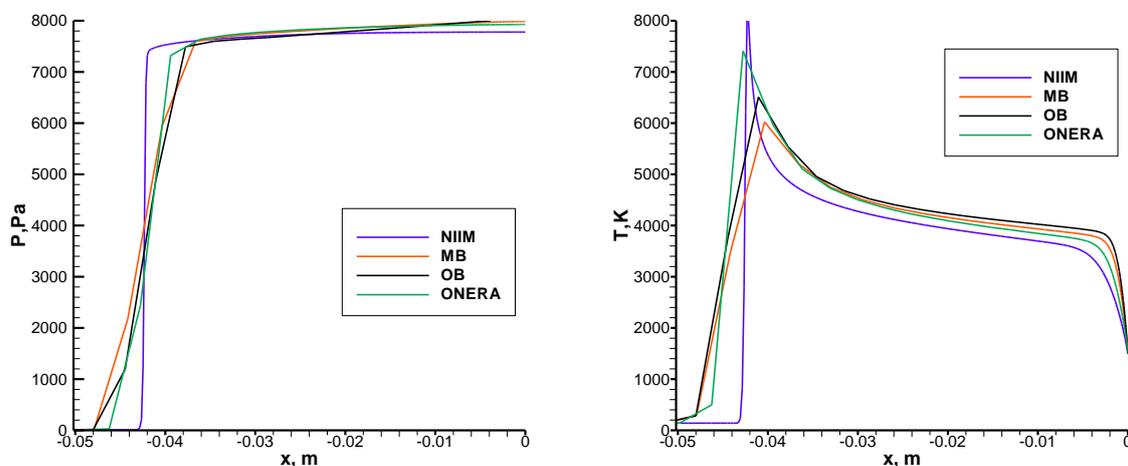
В расчетах использовалась многогрупповая модель в LTE - приближении, учитывающая излучение молекул CO и CO₂, вызванное колебательно-вращательными переходами в интервале длин волн 2-10μm (IR). Алгоритм ABSORB_AGM, разработанный в ИПМех [4], использовался для расчета спектральных коэффициентов поглощения. Для расчета спектральных коэффициентов поглощения молекул CO и CO₂ в (IR) спектральном диапазоне, применялась версия алгоритма ABSORB_AGM, использующая билинейную интерполяцию по температуре и волновым числам табличных данных для $K_{\omega}(T)$, приведенных в [5] для интервала температур 300-3000 К. Вне этого интервала значение $K_{\omega}(T)$ предполагалось постоянным. Расчеты в НИИМех были проведены для: K=100 - число спектральных групп; L=10 - число спектральных интервалов в группе; 2M=20, N=20 - число угловых интервалов.

4. Анализ результатов расчетов полей течения

4.1. Навстремленная часть тела

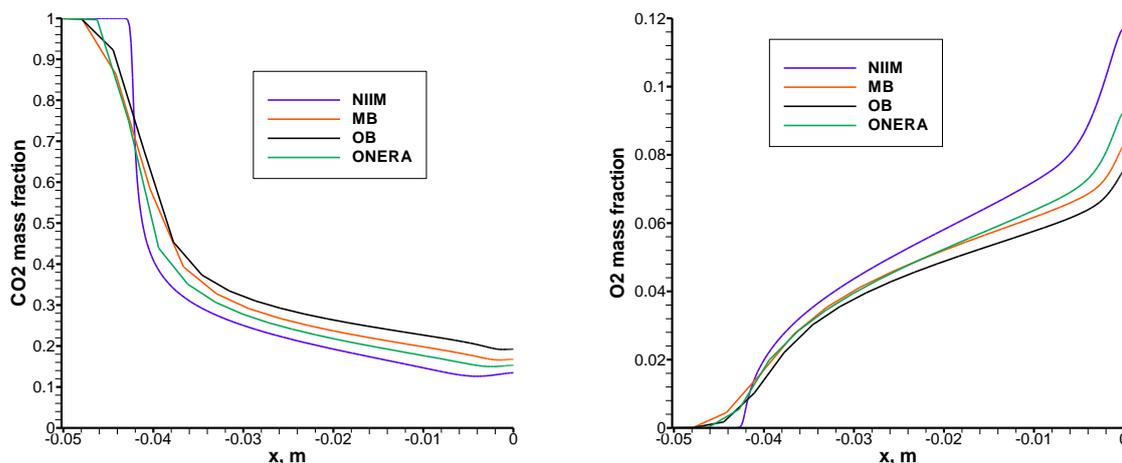
4.1.1. Линия торможения

Сравнение распределений некоторых газодинамических параметров течения вдоль передней линии торможения, представленных ONERA и НИИМех, дано на фиг. 7-8.



Фиг. 7: Распределения статического давления и температуры вдоль передней линии торможения

Как видно из представленных распределений, профили давления и температуры, рассчитанные в НИИМех на сетках G-OB-TC3-1 и G-MB-TC3-1, близки. В расчетах ONERA (G-OB-TC3-1 сетка) максимальное значение температуры на фронте головного скачка на 1000 К выше по сравнению с результатом НИИМех, полученным на той же сетке. В расчетах на многоблочной сетке НИИМех, адаптированной к головной ударной волне, максимальное значение температуры во фронте волны на 2000 К выше по сравнению с результатами, полученными в НИИМех на сетках G-OB-TC3-1 и G-MB-TC3-1; отличается также положение головного скачка. Расчет на адаптированной к головной ударной волне многоблочной сетке НИИМех лучше описывает течение в этой области по сравнению с расчетами на других сетках. Статические давления, предсказанные НИИМех и ONERA, близки на передней линии торможения. Наибольшее, по сравнению с остальными, «размазывание» головного скачка наблюдается в расчетах НИИМех на сетке G-MB-TC3-1, что объясняется большей разреженностью этой сетки в области головной ударной волны. Из сравнения с результатами работы [2] можно сделать вывод, что сетка, разработанная в НИИМех, лучше «ухватывает» головной скачок, из-за чего и наблюдается больший температурный пик на нем по сравнению с расчетами на других сетках.

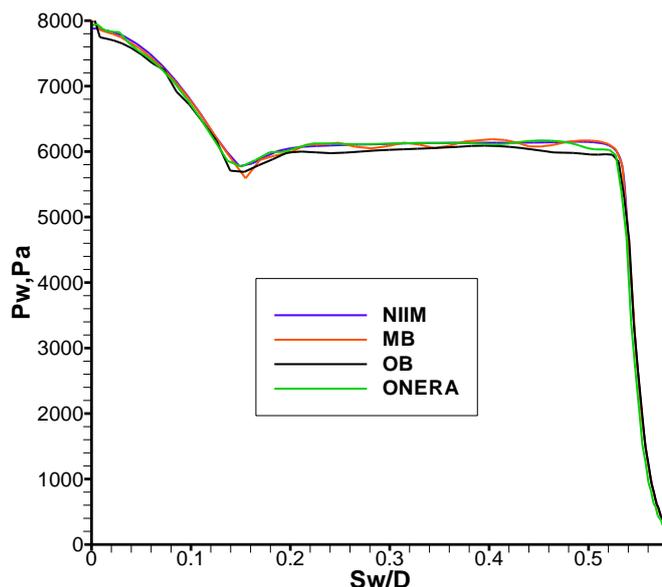


Фиг. 8: Распределения массовых концентраций CO_2 и O_2 вдоль передней линии торможения

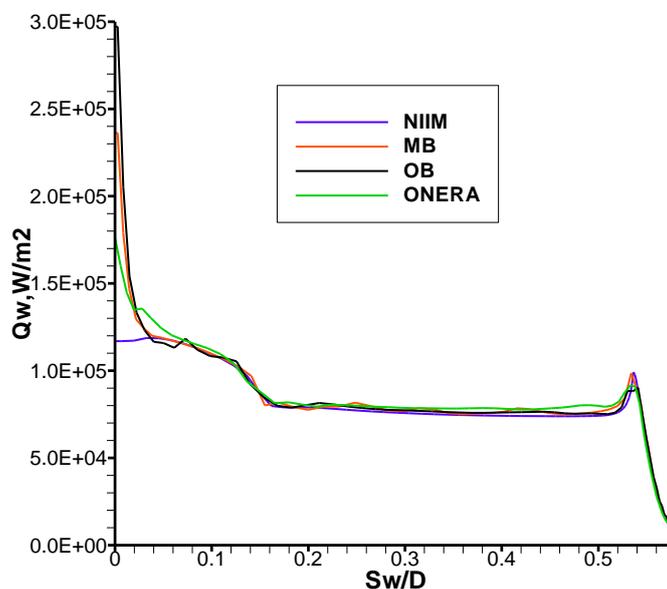
Сравнение распределений концентраций компонентов CO_2 и O_2 вдоль линии торможения, в расчетах на разных сетках, позволяет получить лучшие результаты в области головной ударной волны для адаптивной сетки НИИМех. В дальнейшем это приводит к большему снижению концентрации CO_2 (соответственно большему увеличению O_2) около поверхности тела (Фиг.8). Распределения CO_2 и O_2 вдоль линии торможения, полученные на адаптированной к головному скачку сетке НИИМех, ближе к аналогичным распределениям, представленным в [2] и полученным на улучшенных одноблочных сетках RTech и ONERA.

4.1.2. Поверхность наветренной части аппарата

Распределения давления по поверхности аппарата с наветренной стороны приведены на фиг. 9 для всех сравниваемых расчетов. Наблюдается хорошее совпадение для давления во всех расчетах, проведенных на различных сетках в НИИМех и ONERA, и эти результаты находятся в хорошем согласии с данными, приведенными в [2]. Наибольшее абсолютное различие в давлении не превышает 100 Па, т.е. 1.5%.



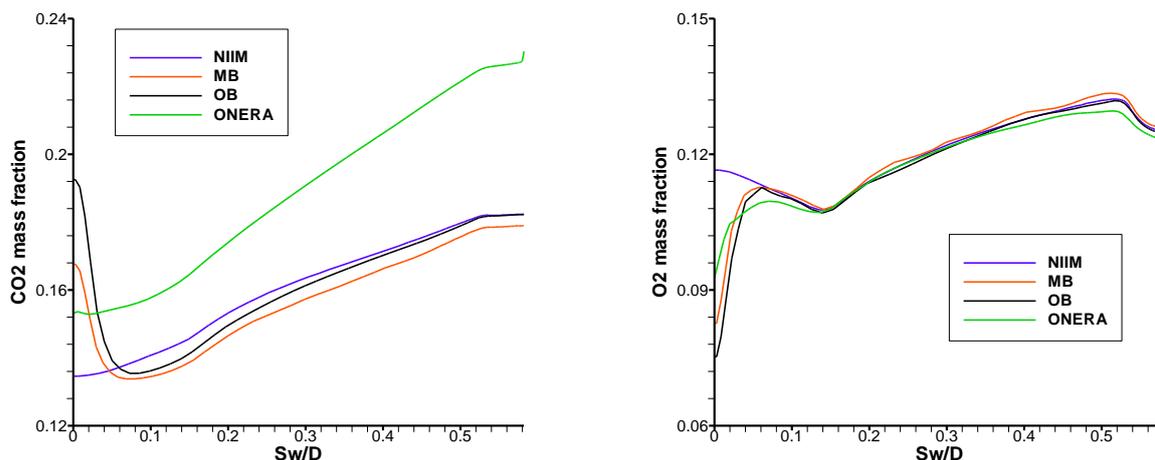
Фиг. 9: Распределение давления по лобовой поверхности модели



Фиг. 10: Распределение конвективного теплового потока по поверхности переднего затупления модели

На фиг.10 показано сравнение распределений конвективного теплового потока, полученных в расчетах на различных сетках. Результаты также близки друг к другу, хотя отличие ($\sim 5\%$) больше, чем наблюдалось для давления. Основное отличие отмечено в области точки торможения модели, где в большинстве расчетов возникают нефизические экстремумы. Их появление для большинства сеток обусловлено «численной завихренностью» потока в зоне линии торможения вследствие пересечения головным скачком сеточной линии одного из семейств, которое при использовании адаптированной сетки НИИМех устраняется специальным алгоритмом подгонки сетки к скачку. Поэтому она дает распределения теплового потока без нефизических особенностей. Появление локального максимума в распределении теплового потока в области мидела тела

обусловлено увеличением кривизны контура в этой зоне. Значения в точке максимума близки для всех расчетных сеток.



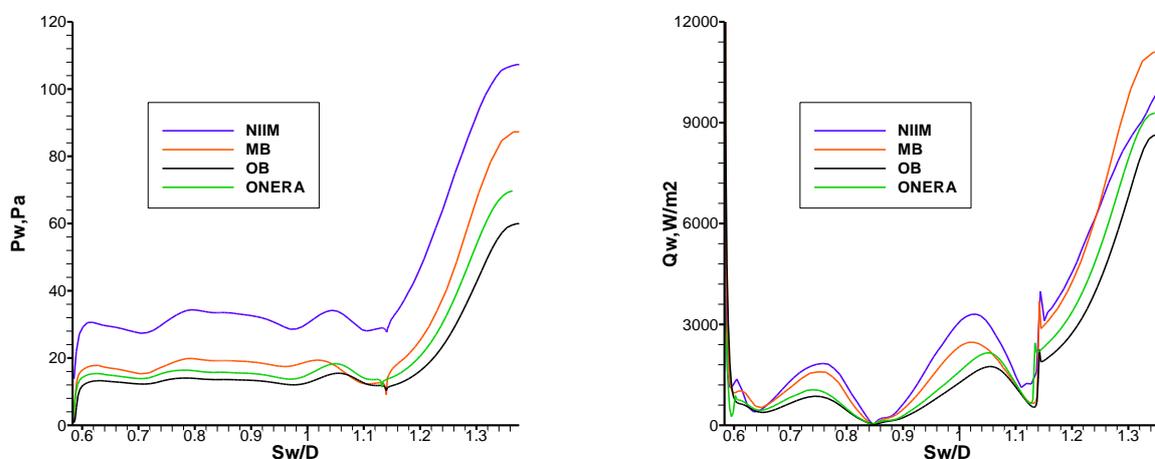
Фиг. 11: Распределение массовых концентраций CO_2 и O_2 по поверхности переднего затупления модели

На фиг. 11 для всех расчетов приведено сравнение распределений массовых концентраций CO_2 и O_2 на лобовой поверхности модели. Различие в концентрациях компонентов в расчетах НИИМех и ONERA на одной и той же сетке наблюдается не только в области точки торможения, которое связано с выше обозначенной причиной, но и на конической части тела (~ 16% - 20%).

4.2. Подветренная сторона модели

4.2.1. Поверхность модели

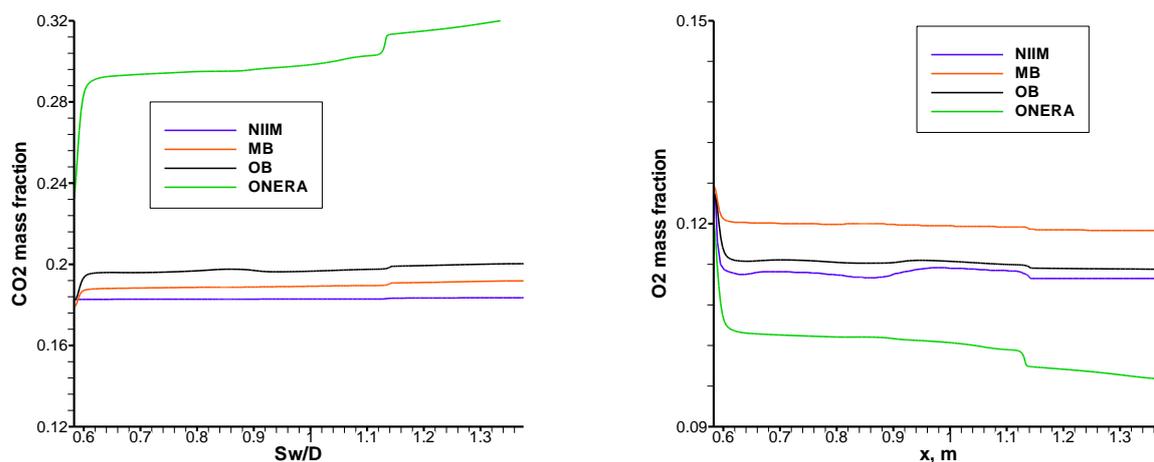
Сравнение распределений давления и конвективного теплового потока по поверхности модели с подветренной стороны для всех проведенных расчетов иллюстрирует фиг.12.



Фиг. 12: Распределение давления и конвективного теплового потока по поверхности модели с подветренной стороны

Проведенное сравнение позволяет сделать вывод о хорошем совпадении результатов всех расчетов, за исключением полученных на сетке НИИМех. Расчеты на ней дают на подветренной стороне модели завышенные значения давления и теплового потока по сравнению с остальными, однако, более близкие к результатам расчетов на многоблочной адаптированной сетке R-Tech, приведенным в [2]. Небольшие отличия наблюдаются и в расчетах, представленных в НИИМех и ONERA для одной и той же сетки. Сравнивая распределения тепловых потоков на цилиндрической поверхности модели с подветренной стороны для многоблочных сеток RTech и НИИМех, отметим меньшие различия в результатах в сравнении с другими сетками. В задней точке торможения это различие снова увеличивается.

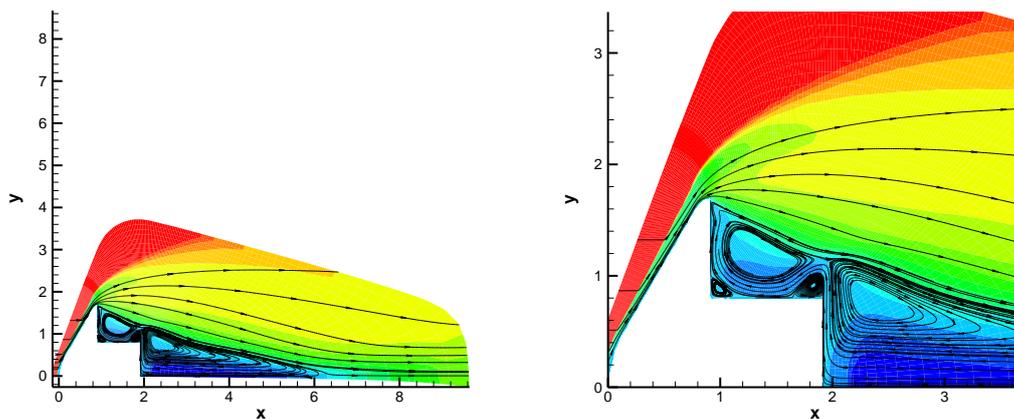
Массовые концентрации CO_2 и O_2 на поверхности модели с подветренной стороны представлены на фиг.13. Здесь также следует отметить различия в результатах, полученных в НИИМех и в ONERA для одинаковых сеток.



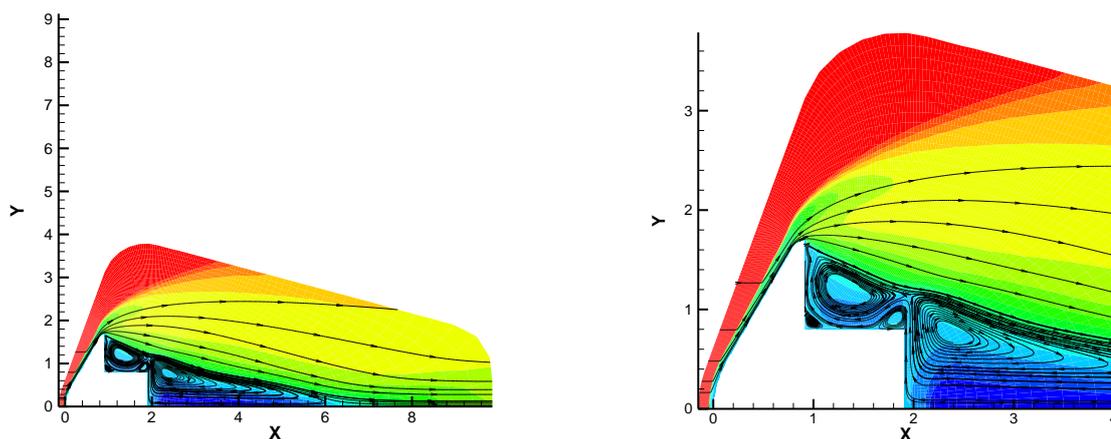
Фиг. 13: Распределения массовых концентраций компонентов CO_2 и O_2 по поверхности модели с подветренной стороны

4.2.2. Поля течения

Подробный анализ влияния используемых в расчетах сеток на топологию течения в следе приведен в [2]. Сравнение полей течения и линий тока, полученных в НИИМех и в ONERA на одной и той же расчетной сетке G-OB-TC3-1, указывает на их фактическую идентичность (фиг.14 и фиг.15). На фигурах приведены изолинии продольной компоненты скорости течения. Наблюдается образование на подветренной стороне около цилиндрической части модели трех вихревых зон и хвостовой зоны возвратно-циркуляционного течения. Присоединение потока в следе происходит на расстоянии $\sim 6 - 6.5$ м.

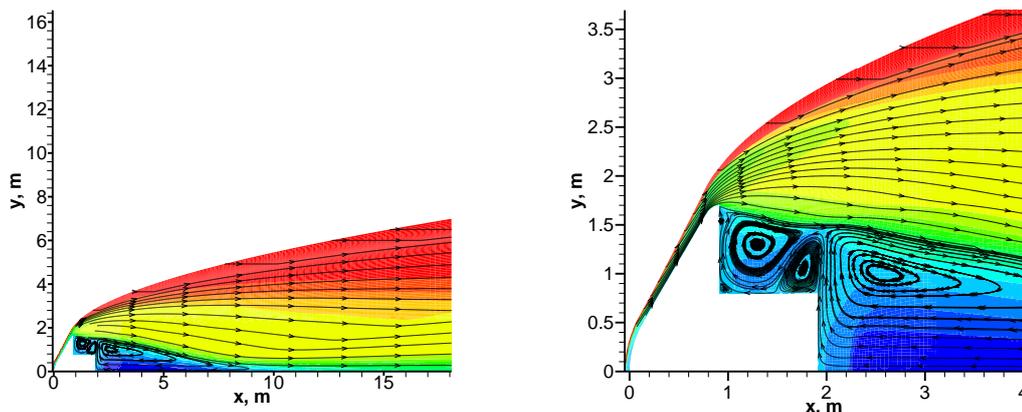


Фиг. 14: Топология течения в следе: расчеты ONERA на сетке G-OB-TC3-1



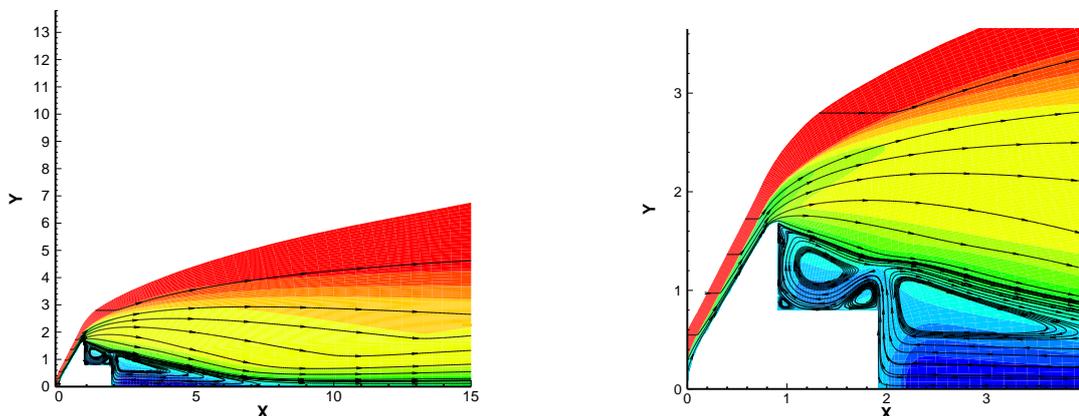
Фиг.15: Топология течения в следе: расчеты НИИМех на сетке G-OB-TC3-1

Расчет, проведенный на сетке НИИМех, по сравнению с сеткой G-OB-TC3-1, привел к появлению пятого вихря, локализованного в области миделя с подветренной стороны модели (фиг.16).



Фиг.16: Топология течения в следе: расчеты на сетке НИИМех

Размеры вихревой зоны, расположенной в конце цилиндрической части модели около угловой точки, увеличились, слой смешения передвинулся дальше от поверхности модели, а точка присоединения в ближнем следе переместилась вниз по потоку и заняла положение $\sim 9 - 10$ м.

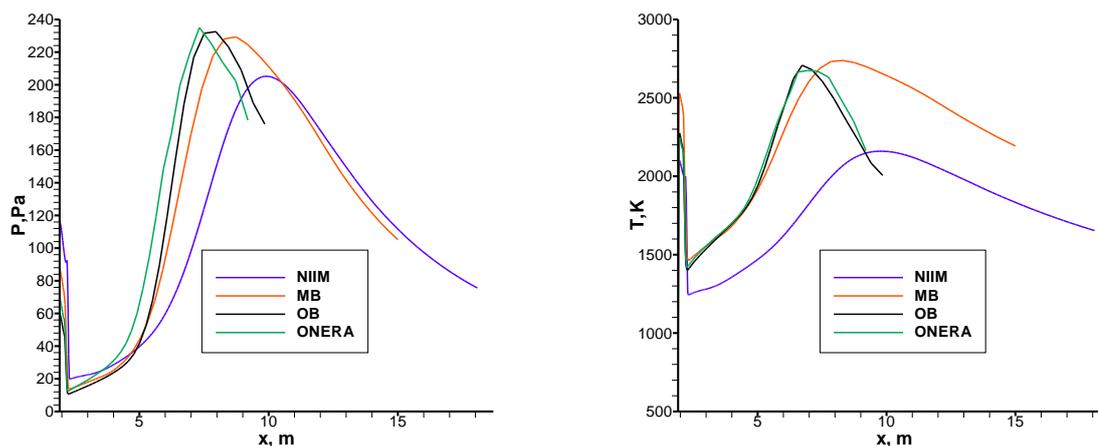


Фиг.17: Топология течения в следе: расчеты НИИМех на сетке G-MB-TC3-1

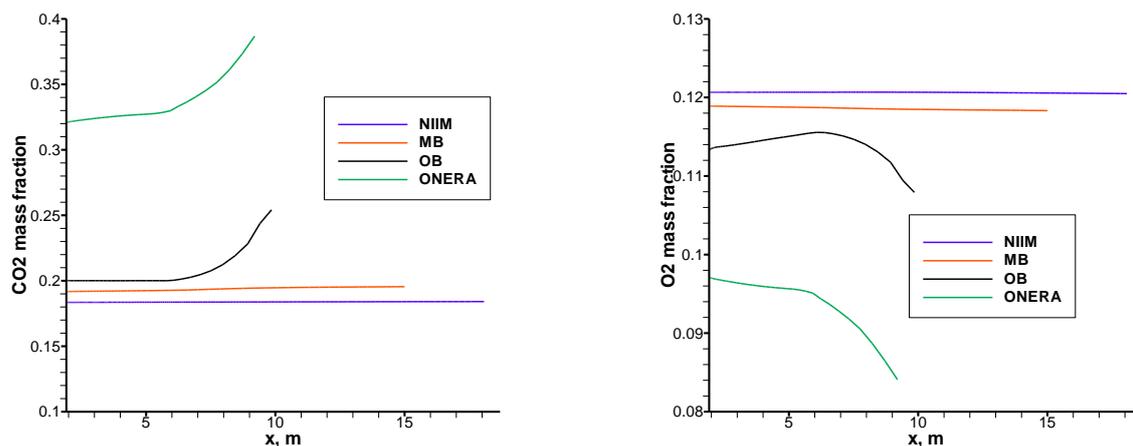
По сравнению с расчетами на сетках G-OB-TC3-1 и НИИМех точка присоединения потока в следе, полученная в расчетах на сетке G-MB-TC3-1, располагается на расстоянии $\sim 7-8$ м (фиг.17). Размеры вихря около угловой точки цилиндрической части модели уменьшились по сравнению с расчетами на сетке НИИМех, а слой смешения сместился ближе к поверхности модели. При этом, также как для сетки НИИМех, видно образование пяти вихревых зон. Для всех расчетов, выполненных в НИИМех и ONERA картины течения с подветренной стороны модели близки, однако отличаются от обсуждаемых в [2], где только расчеты на адаптированной многоблочной сетке R-Tech привели к образованию трех вихрей.

4.2.3. Данные на оси симметрии в следе

Данные на оси следа, представленные на фиг.18., безусловно, коррелируют с топологией течения в следе, обсужденной выше. Положения точек максимума давления и температуры на оси соответствуют положению точки присоединения потока в следе. Наилучшее совпадение представленных результатов с [2] наблюдается для «улучшенных» одноблочных расчетных сеток R-Tech и ONERA.



Фиг. 18: Распределения давления и температуры на оси симметрии в следе

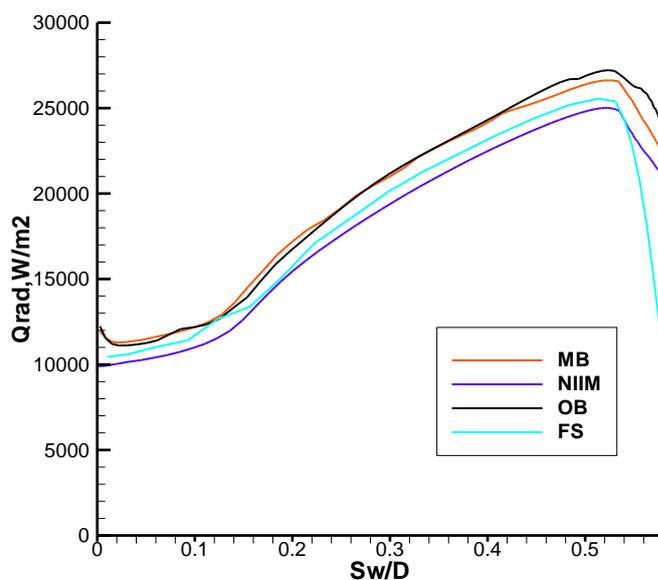


Фиг. 19: Распределения массовых концентраций CO_2 и O_2 на оси симметрии в следе

Массовые концентрации CO_2 и O_2 вдоль оси симметрии в следе изображены на фиг. 19. Отметим, что данные НИИМех для всех сеток близки, но отличаются от результатов, представленных ONERA.

5. РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

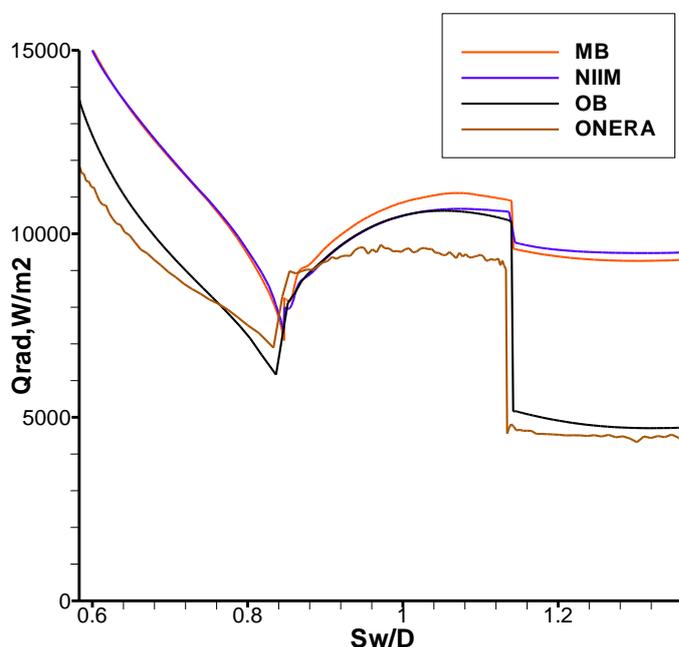
Данные по радиационным тепловым потокам, согласно правилам ТСЗ-1, необходимо приводить в заданных точках на поверхности модели и в следе. Однако в данной работе сравниваются радиационные тепловые потоки для всей поверхности модели, полученные в расчетах на различных сетках. Это сравнение для наветренной части модели представлено на фиг. 20.



Фиг. 20: Распределение радиационного (IR) теплового потока вдоль наветренной стороны модели

Фиг. 21 демонстрирует сравнение радиационных тепловых потоков на подветренной стороне модели, рассчитанных в НИИМех на различных сетках и представленного

ONERA, без учета излучения нагретой поверхности модели. Наблюдается значительное превышение радиационных тепловых потоков на торцевых частях с подветренной стороны модели для сетки НИИМех и G-MB-TC3-, по сравнению с остальными. Это различие может быть объяснено дополнительным лучистым нагревом из областей течения вниз по потоку, который не может быть получен при использовании ограниченных в продольном направлении остальных расчетных сеток. Одновременно отметим удовлетворительное согласие между полученными в НИИМех и представленными в [2] результатами по радиационным тепловым потокам.



Фиг. 21: Распределение радиационного (IR) теплового потока вдоль подветренной стороны модели

6. Выводы

6.1 Течение на наветренной стороне:

- адаптированные к головной ударной волне расчетные сетки дают результаты лучше соответствующие физике течения в этой зоне, позволяют устранить нефизические осцилляции в распределениях теплового потока в области линии торможения, хотя использование таких сеток может вызвать трудности их применения в расчетах по другим алгоритмам;
- сгущение расчетных сеток к поверхности модели является необходимым, но излишнее сгущение к поверхности тела не требуется;
- сравнение всех представленных результатов показывает, что различие в конвективных тепловых потоках на наветренной стороне модели $\sim 5\%$;
- наличие нефизической особенности в распределении тепловых потоков в области точки торможения препятствует объективному сравнению результатов.

6.2. Течение на подветренной стороне:

- топология полученного в расчете течения особенно чувствительна к используемой конечно-разностной сетке, порядку численной схемы и меньше - к методу расчета;
- давление и тепловые потоки также чувствительны к этим обстоятельствам;

- расчетная сетка должна быть адаптирована к течению в следе, и позволять адекватно рассчитывать течение около угловых точек цилиндрической части модели;
- многоблочные сетки имеют преимущества для расчетов поля течения около всей модели.

6.3 Расчет радиационных тепловых потоков:

- наибольшее влияние на рассчитанные радиационные тепловые потоки оказывает выбор спектральной модели излучения;
- важным для анализа радиационного теплообмена является сравнение расчетов для идентичных газодинамических полей течения.

Работа финансировалась в рамках проекта ИНТАС № 5204.

Литература

1. Workshop 2003 “Radiation of High Temperature Gas”, TC3: Definition of an axially symmetric testcase for high temperature gas radiation prediction in Mars atmosphere entry, NG104-07-TF-001-CNES, 2003.
2. Jean-Marc Charbonnier, Analysis of the results for TC3 presented at the 1st Int. Workshop on radiation on high temperature gas in planetary atmosphere entry, Proceeding of International Workshop on Radiation of High Temperature Gases in Atmospheric Entry, 8-10 October, Lisbon, Portugal, pp.145-159, 2003.
3. Afonina N.E., Gromov V.G., Sakharov V.I., “HIGHTEMP Technique of High Temperature Gas Flow Numerical Simulation”, Proc.of 5-th Europ. Symp. Aerothermodynamics for Space Applications, Nov.2004, Cologne, Germany,
4. Surzhikov S.T., Computing System for Solving Radiative Gasdynamic Problems of Entry and Re-Entry Space Vehicles, Proc. RGD Workshop, 8-10, October, Lisbon, Portugal, 2003.
5. Hmelinin, B.A., Plastinin, Yu.A., “Emissivity and Absorptivity of H₂O, CO₂, CO and HCl molecules at temperatures 300-3000 K,” Trudy TsAGI, No. 1656, 1975, pp.102-147 (in Russian)