



Национальный  
исследовательский

**Томский  
государственный  
университет**



**Суперкомпьютерные  
дни в России 2019**

# **Simulation of "ExoMars" Spacecraft Landing on the Surface of Mars Using Supercomputer Technologies**

Anuar Kagenov, Sergey Prokhanov, Anatoliy Glazunov, Ivan Eremin,  
Kirill Kostyushin, Konstantin Zhilcov, Iliya Tyryshkin and Sergey Orlov

Суперкомпьютерные дни в России  
23-24 сентября 2019 г.  
Москва



# Введение



РОСКОСМОС

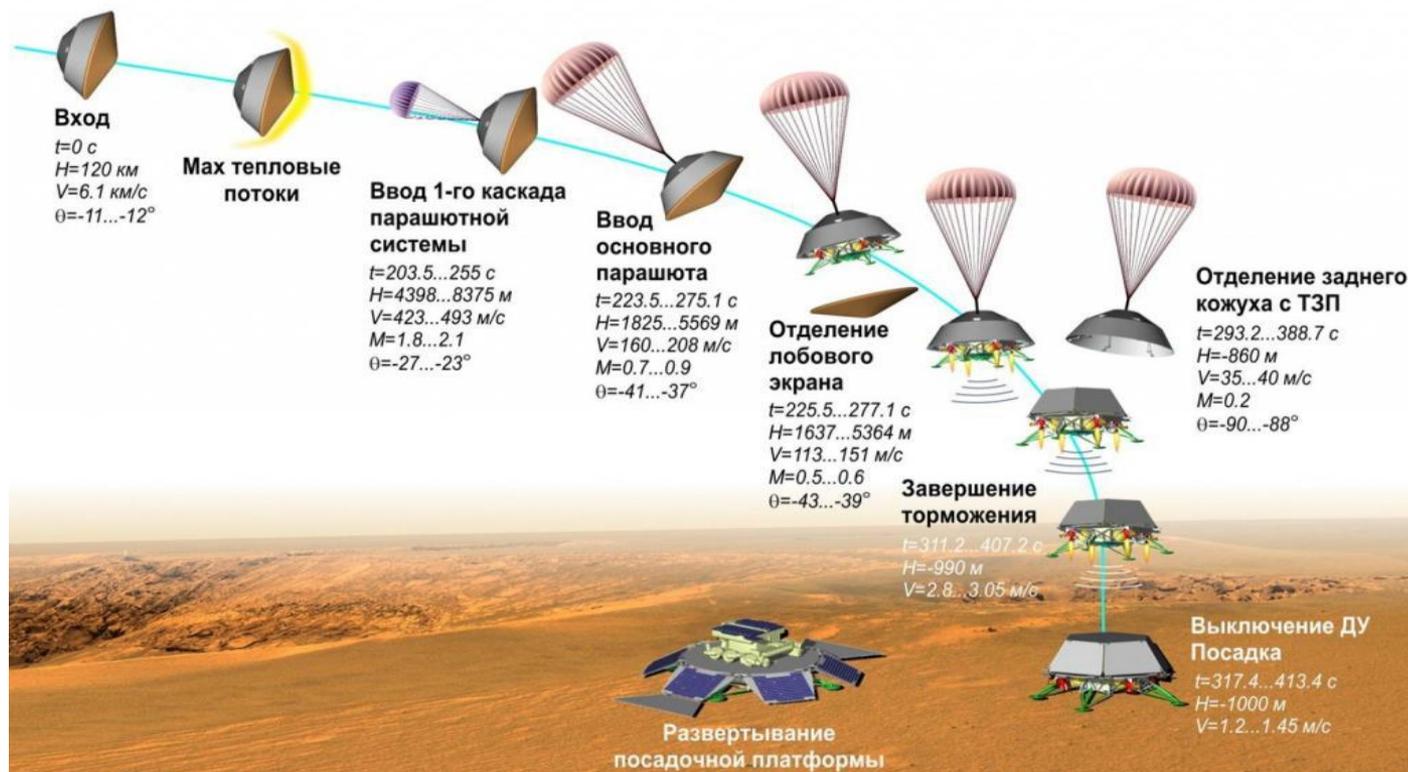


Рис. 1 – Схема движения десантного модуля при его спуске и посадке на поверхность Марса предполагаемая специалистами АО «НПО Лавочкина»

# Физическая постановка задачи

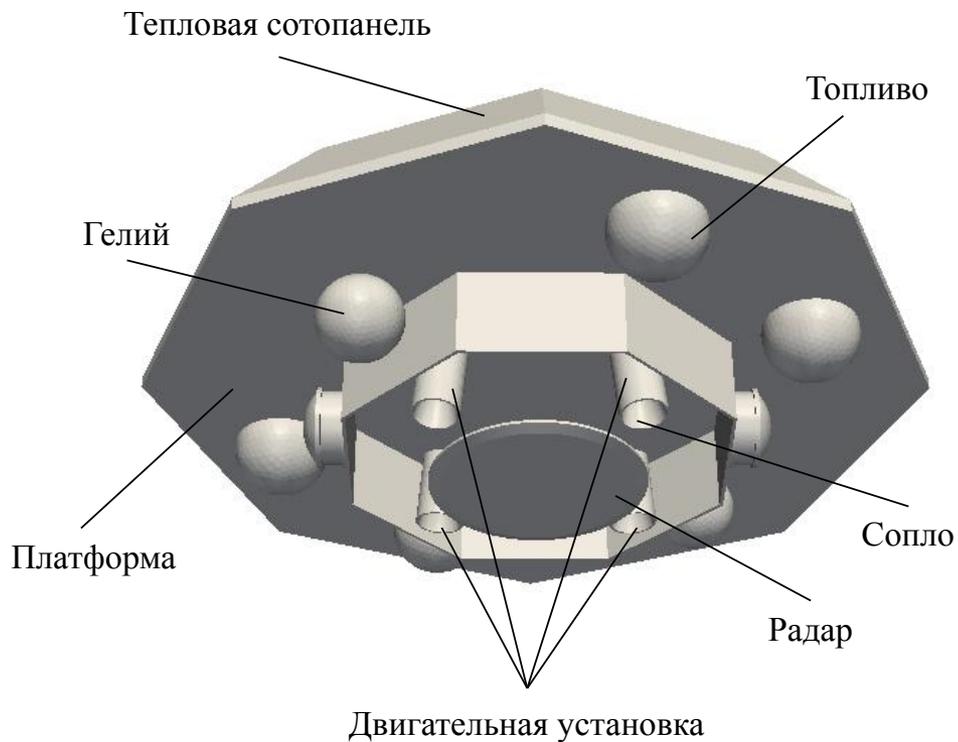


Рис. 2 – Приближенная конфигурация посадочной платформы «ЭкзоМарс»

# Физическая постановка задачи

Четырехкамерная двигательная установка

Газ - продукты сгорания гидразина

Число Маха на срезе сопел  $M \approx 5$

Число Рейнольдса на срезе сопел  $Re \approx 10^5 - 10^6$

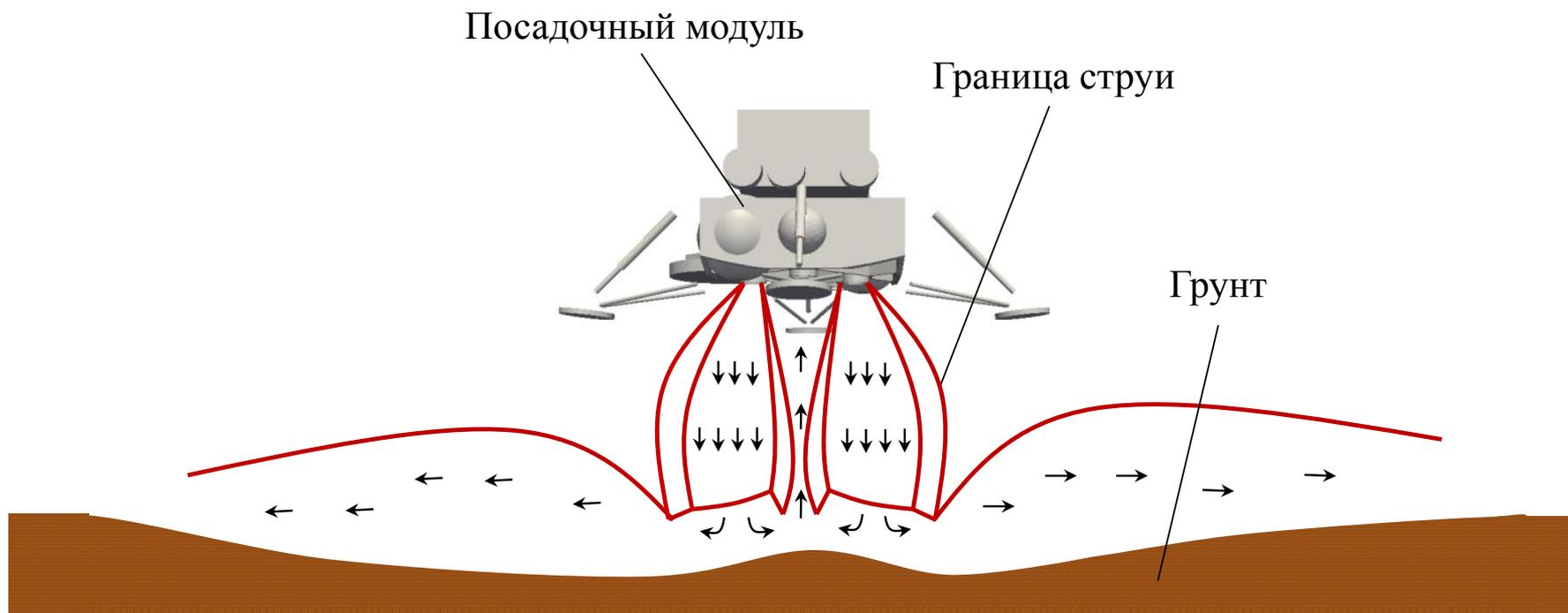


Рис. 3 – Схема взаимодействия струй ДУ с поверхностью посадки



# Математическая постановка

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{r}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{r} v_j = 0. \quad (1)$$

Уравнение движения:

$$\frac{\partial (\bar{r} v_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{r} v_i v_j + \bar{p} d_{ij} - \bar{r} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = 0. \quad (2)$$

Уравнение баланса энергии:

$$\frac{\partial (\bar{r} E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{r} v_j E + v_j \bar{p} + \bar{q}_j - \bar{r} \frac{\partial \epsilon_j}{\partial x_j} = 0. \quad (3)$$

Уравнение состояния идеального газа:

$$\bar{p} = \bar{r} R T \quad (4)$$

Модель турбулентности:

$$SST \ k - w$$

# Математическая постановка

## Начальные и граничные условия

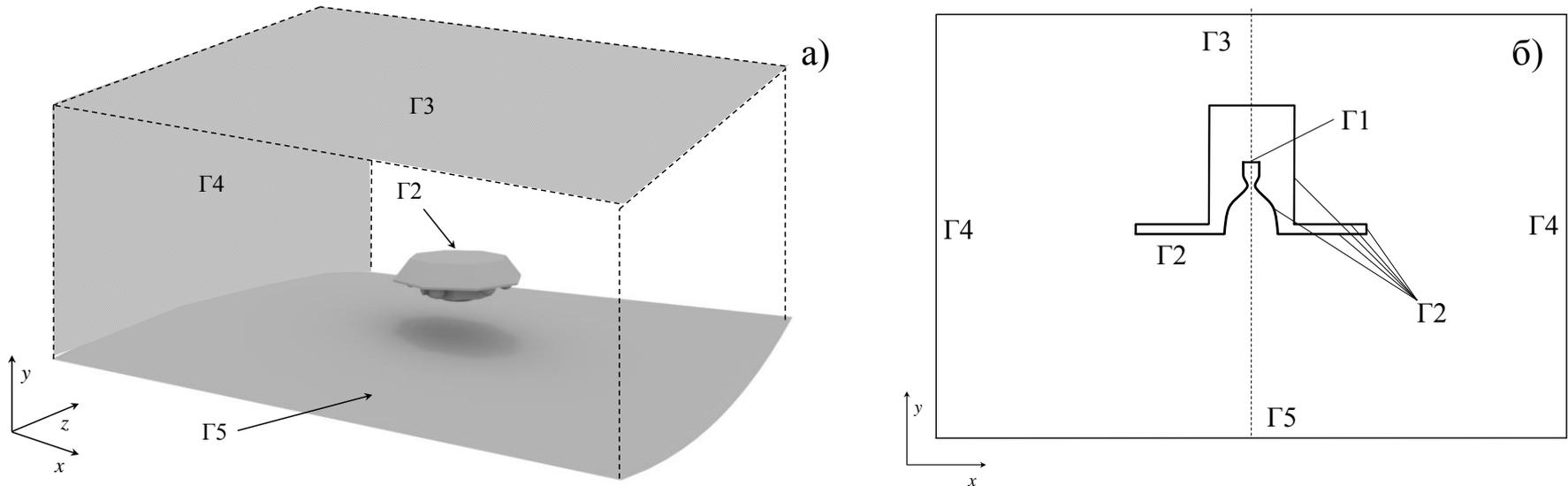


Рис. 4 – Схема расчетной области с обозначением границ  
 а) пространственная; б) упрощенная в сечении.

### Граничные условия:

Γ1 – вход в сопло:  $p = p_0, T = T_0, u_x = 0, u_z = 0, k = k_0, w = w_0$ .

Γ2, Γ5 – твердая стенка:  $u_x = 0, u_y = 0, u_z = 0, \text{grad}(T) = 0$ .

Пристеночная функция *OmegaWallFunctions*

$$\omega = \sqrt{\omega_{vis}^2 + \omega_{Log}^2}, \text{ где } \omega_{vis} = 6\mu / \rho\beta_1 y_1^2; \omega_{Log} = k^{\frac{1}{2}} / C_{\mu}^{\frac{1}{4}} k y_1.$$

Γ3, Γ4 – внешние границы:  $\nabla \cdot \nabla n = 0$ .

### Начальные условия:

$$T = T_a; p = p_a;$$

$$u_x = u_y = u_z = 0;$$

$$k = 0; w = 0.$$



# Расчетная область

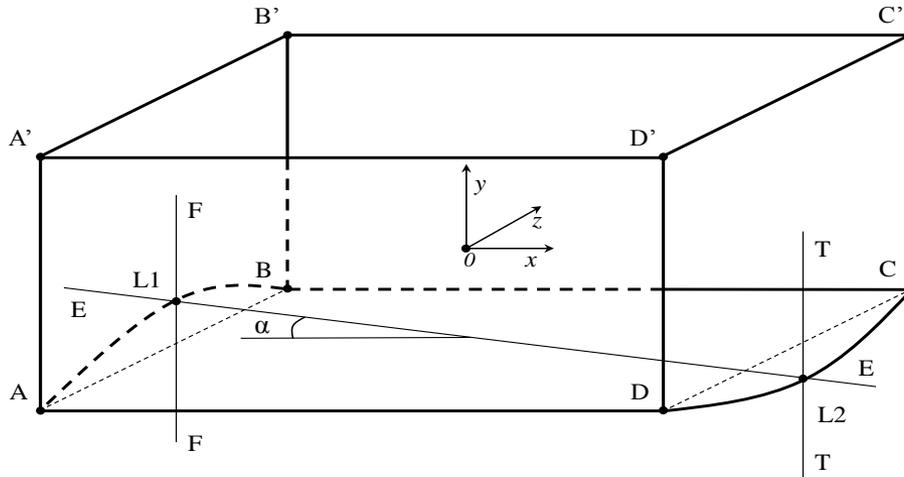


Рис. 9 – Схема внешней расчетной области

Расстояние от среза сопла до поверхности составляло:

- $h=1.0$  метр;
- $h=0.5$  метра;
- $h=0.3$  метра.

Координаты точек  $A, B, C, D$  в декартовой системе координат имели следующие значения (метры):  
Расстояние  $h=1$  метр:

$$A(-10 \ -1 \ -10); B(-10 \ -1 \ 10); C(10 \ -1 \ 10); D(10 \ -1 \ -10);$$

Расстояние  $h=0.5$  метра:

$$A(-10 \ -0.5 \ -10); B(-10 \ -0.5 \ 10); C(10 \ -0.5 \ 10); D(10 \ -0.5 \ -10);$$

Расстояние  $h=0.3$  метра:

$$A(-10 \ -0.3 \ -10); B(-10 \ -0.3 \ 10); C(10 \ -0.3 \ 10); D(10 \ -0.3 \ -10);$$

Координаты точек  $A', B', C', D'$  для всех расстояний  $h$  соответствовали значениям:

$$A'(-10 \ 10 \ -10); B'(-10 \ 10 \ 10); C'(10 \ 10 \ 10); D'(10 \ 10 \ -10).$$



# Геометрические и термодинамические параметры для тормозных двигателей

Таб. 1. Параметры тормозного двигателя четырехкамерной ДУ

Параметр	Минимальный режим	Максимальный режим
Диаметр сопла в критическом сечении, м	0.03613	
Диаметр среза сопла, м	0.19395	
Угол полураствора сопла, град	10	
Длина сопла от критического сечения до среза, м	0.23	
Давление газа в камере, МПа	0.28	1.962
Температура газа в камере, К	1180	1336
Показатель адиабаты	1.33719	1.29222
Газовая постоянная, Дж/(кг·К)	640	571
Молекулярная масса газовой смеси, кг/кмоль	12.97	14.53
Число Маха на срезе сопла	4.771	4.502
Расход газа, кг/с	0.222	1.46
Тяга в пустоту, Н	490.5	3433.5

Параметры окружающей среды:

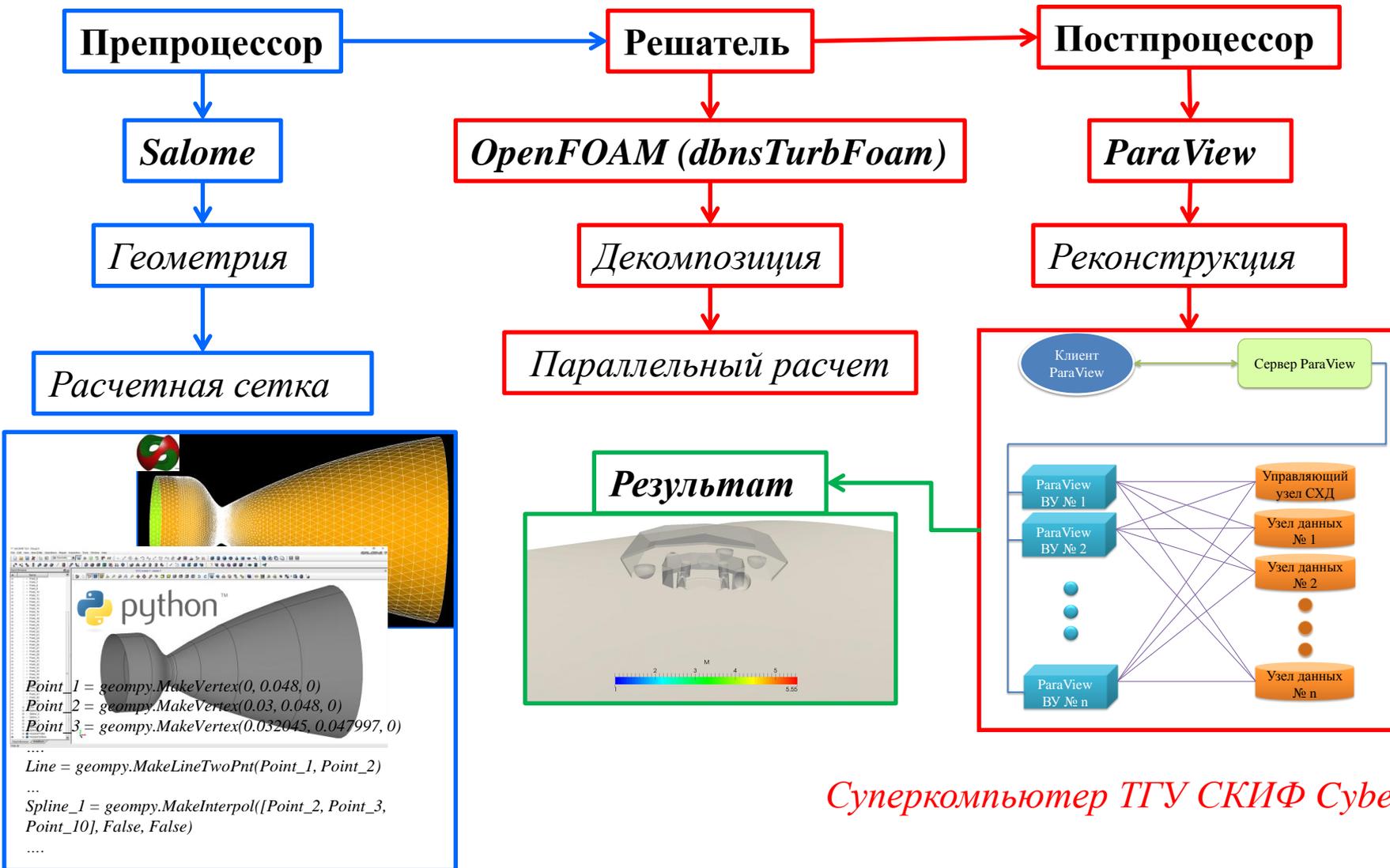
Давление – 650 Па;

Температура – 250 К;

Скорость – 0 м/с.



# Программы



Суперкомпьютер ТГУ СКИФ Cyberia



# Программы

## OpenFOAM Extended

Решатель: *dbnsTurbFoam*

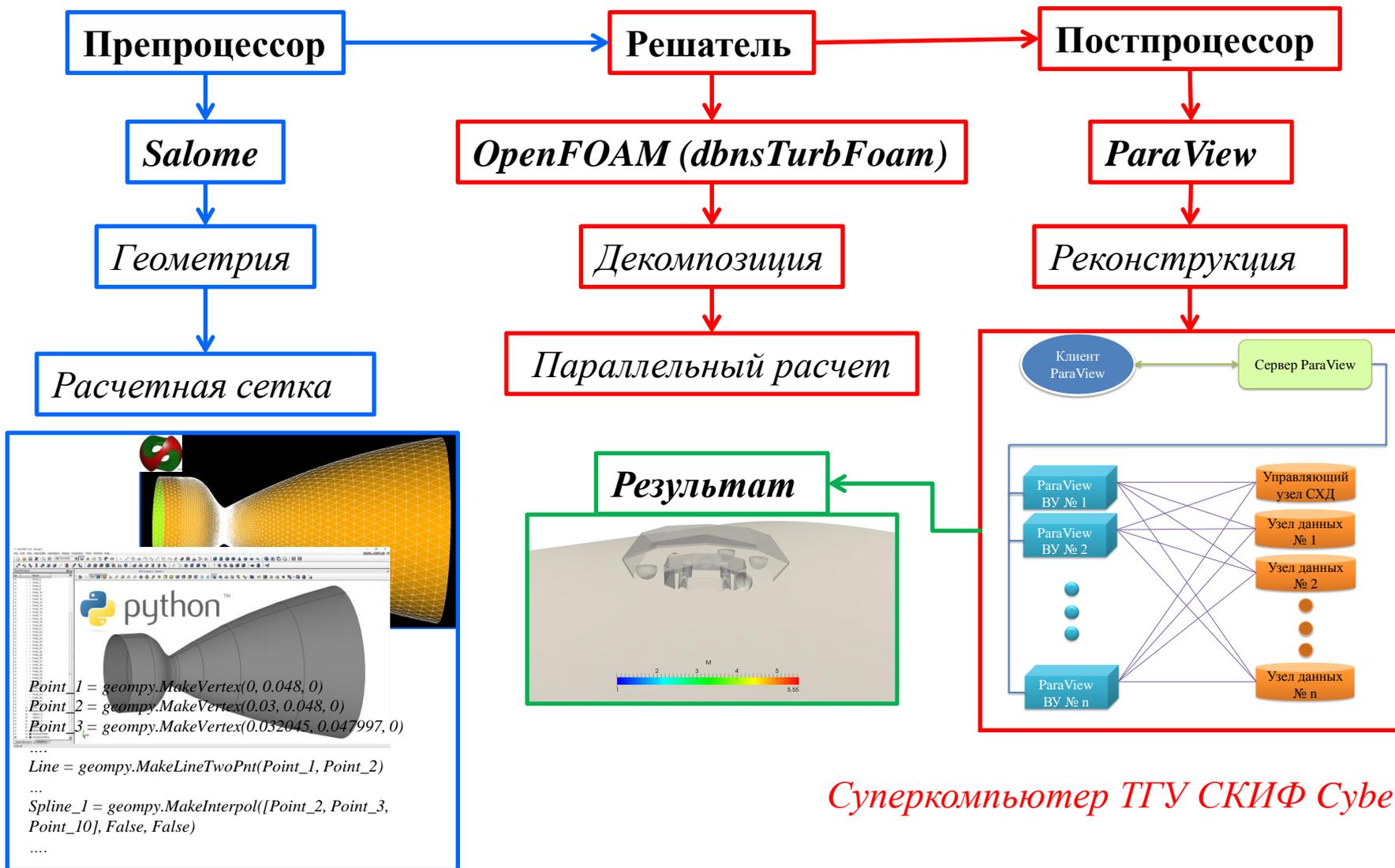
- Метод конечных объемов
- Метод установления
- 4-х шаговый метод Рунге-Кутта
- TVD-схема
- HLLC
- Метод декомпозиции расчетной области Scotch

Open  FOAM

*The Open Source CFD Toolbox*



# Программы





# Суперкомпьютер ТГУ

## Спецификация серверов:

### **Dell R540**

*2xIntel Xeon Gold 5118, 128 Гб ОЗУ, SSD 2x240 Гб M.2*

### **Dell R440**

*2xIntel Xeon Silver 4114, 96 Гб ОЗУ, SSD 2x240 Гб M.2*

### **V-Class**

*2xIntel Xeon E5-2695V3, 256 Гб ОЗУ, SSD 500 Гб, 2xTesla K80\**

### **HP ProLiant SL250s**

*2xIntel E5-2609, Xeon Phi 5100, 96 Гб ОЗУ RAM, HDD RAID (mirror) 1Тб*

### **T-Blade 2.0**

*2xIntel Xeon 5670, 24 Гб ОЗУ*

### **T-Blade 1.1**

*2xIntel Xeon 5670, 48 Гб ОЗУ, HDD 150 Гб (SSD 250 Гб)\**

### **Supermicro**

*2xIntel Xeon 5675, 24 Гб ОЗУ, HDD 1 Тб (SSD 250 Гб)\*, Nvidia GTX 1070*

### **Panasas ActiveStor 8/11/14**



# Расчетная сетка

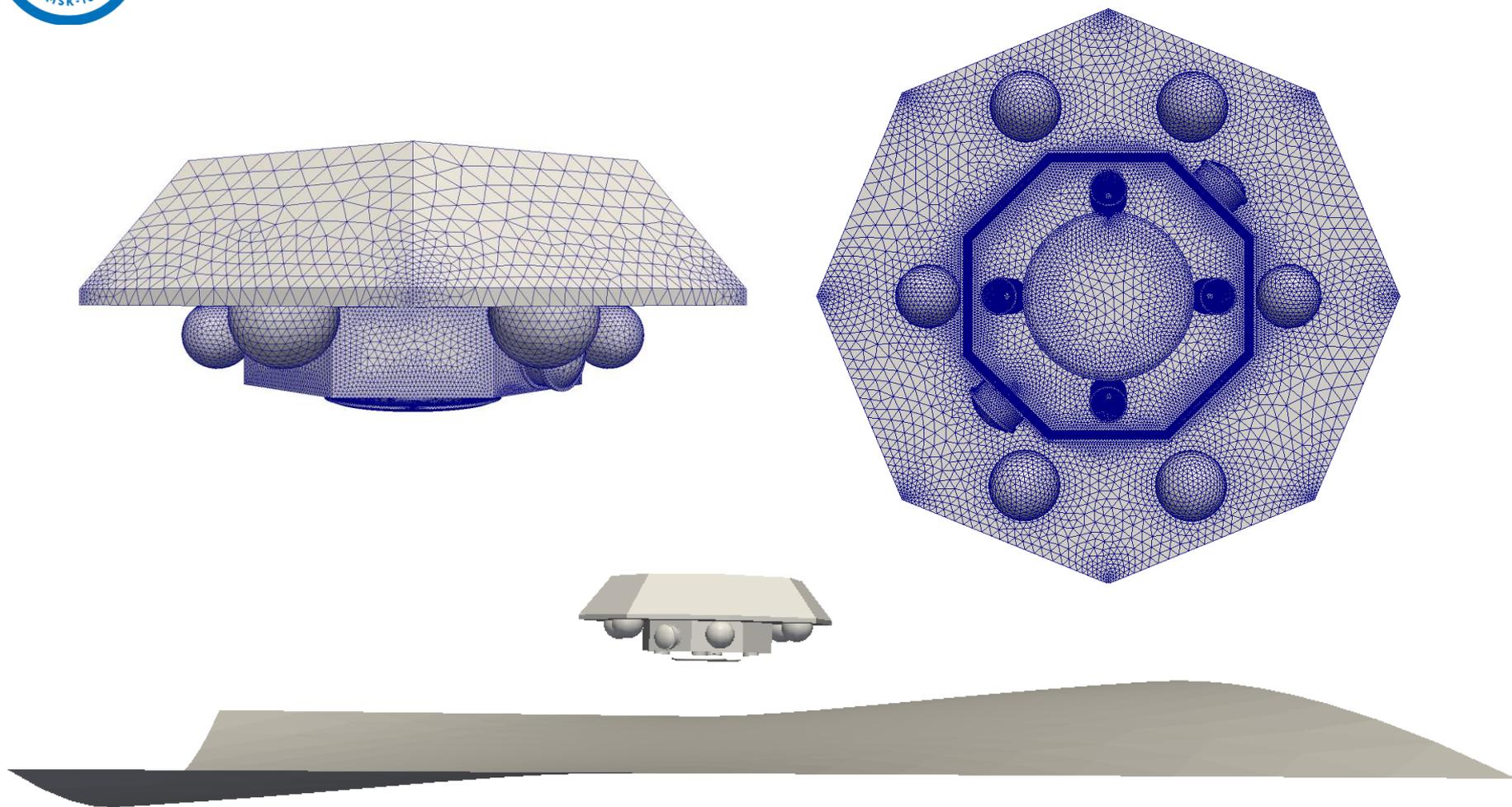


Рис.5 – Геометрия и расчетная сетка

# Расчетная сетка

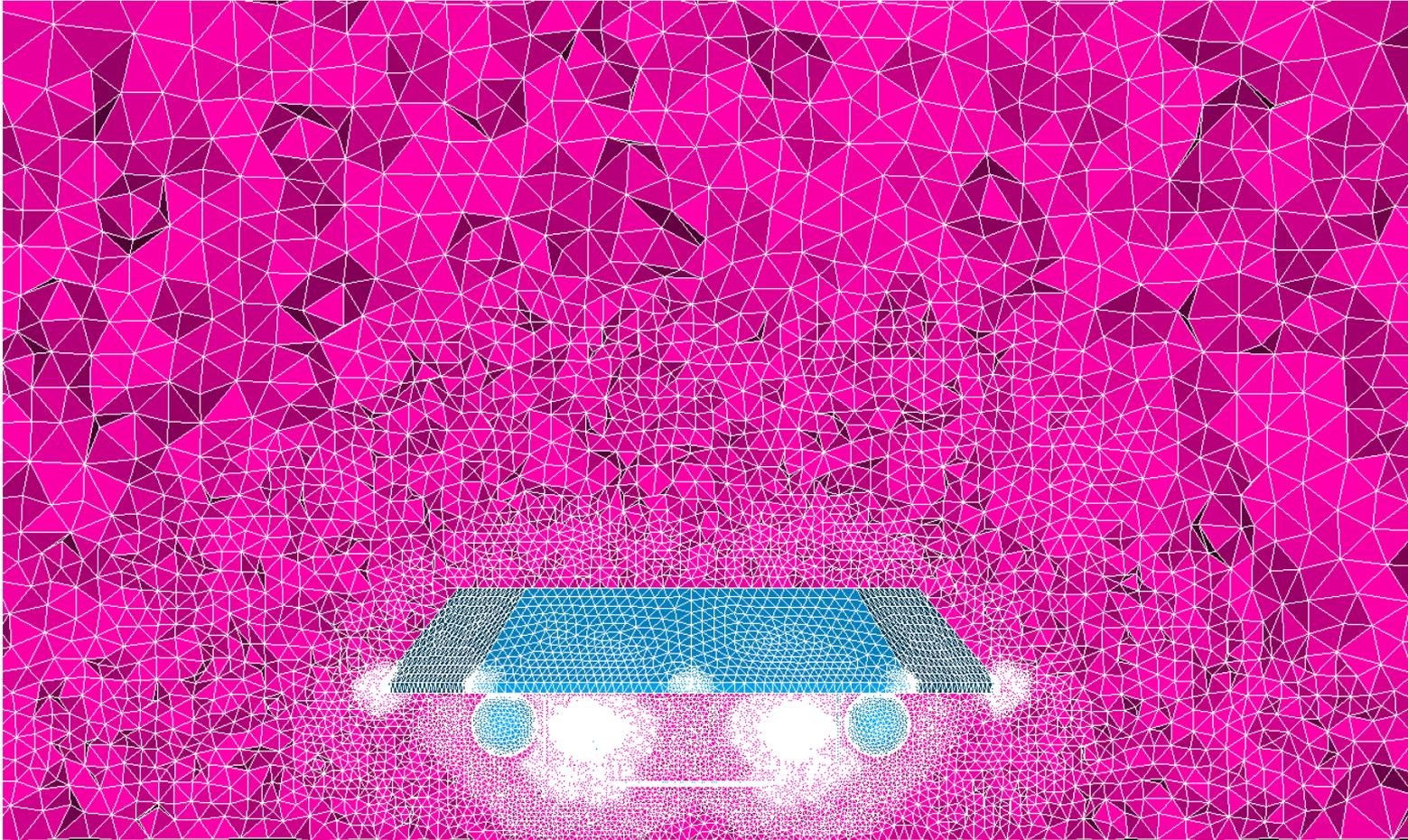


Рис.6 – Расчетная сетка



# Тестирование производительности

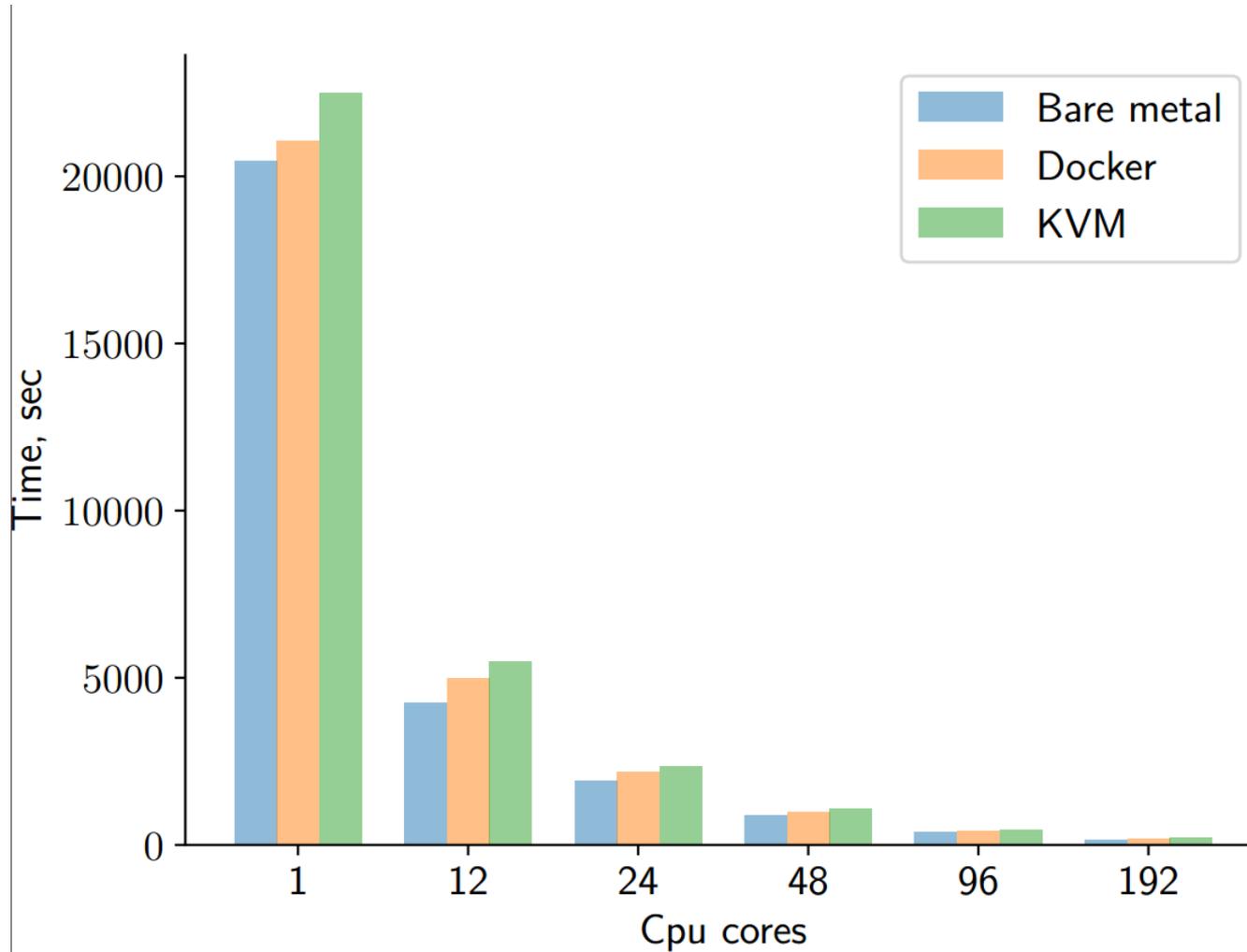


Рис.7 – Сравнение производительности



# Тестирование производительности

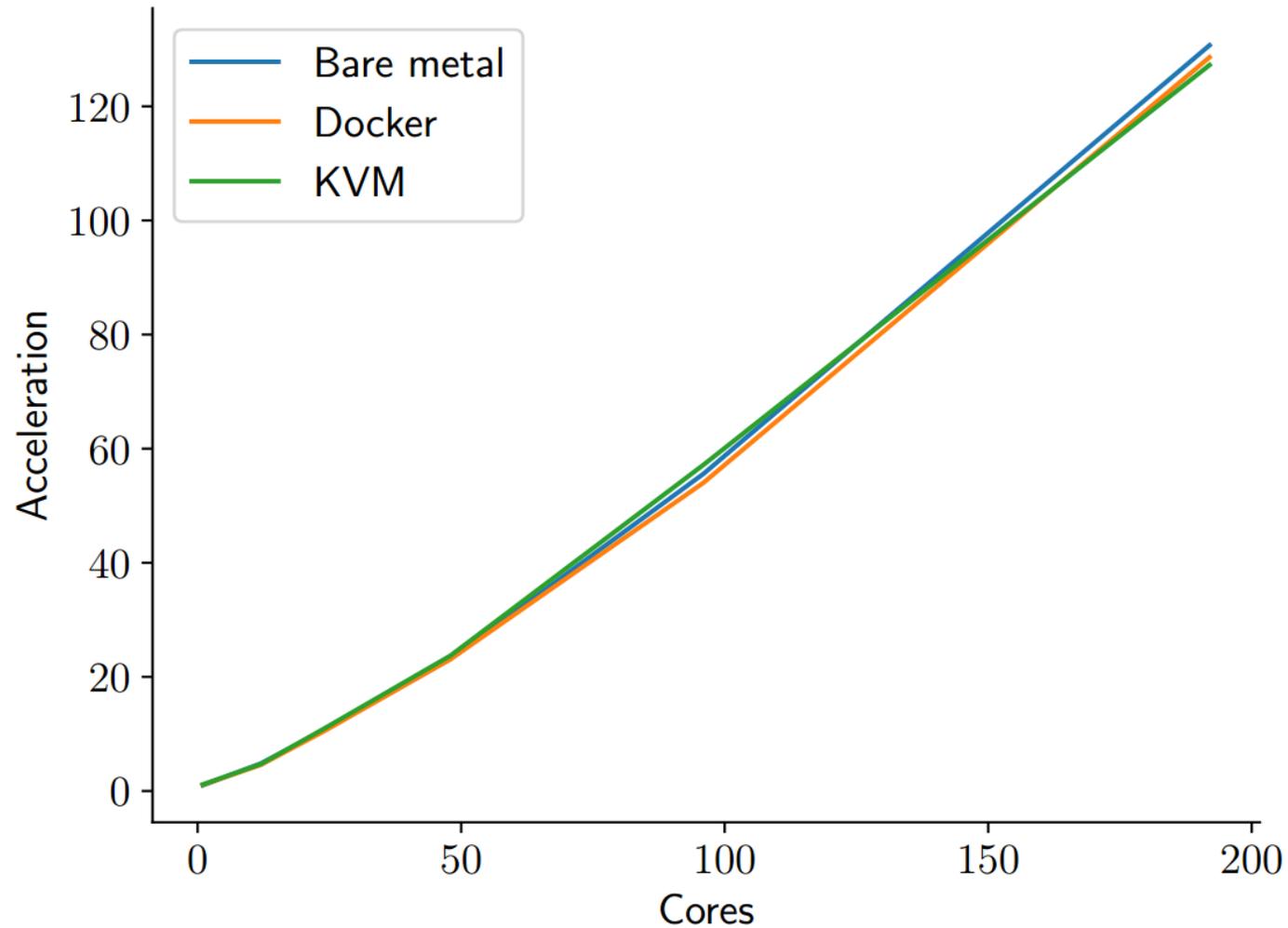


Рис.8 – График ускорения

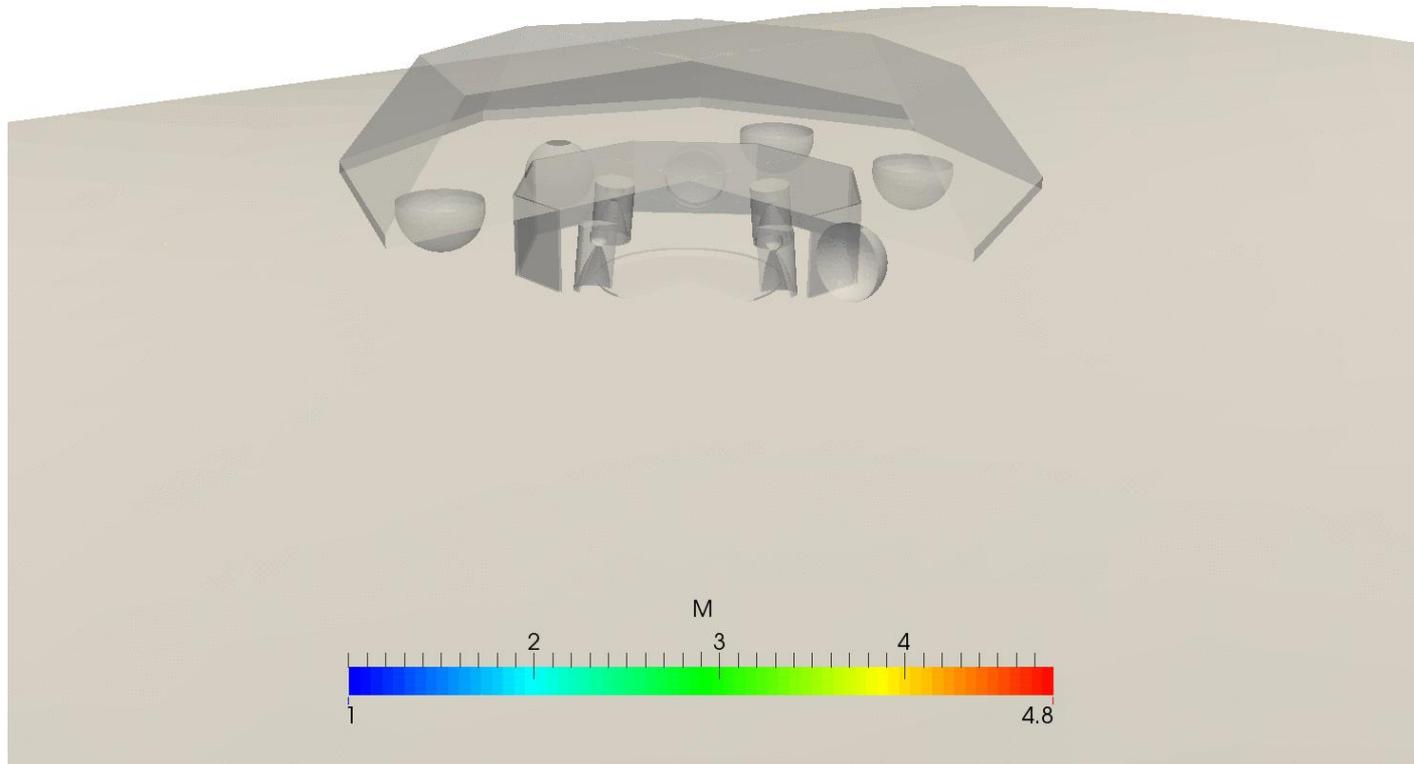


Рис.9 – Изоповерхности числа Маха, минимальный режим ДУ

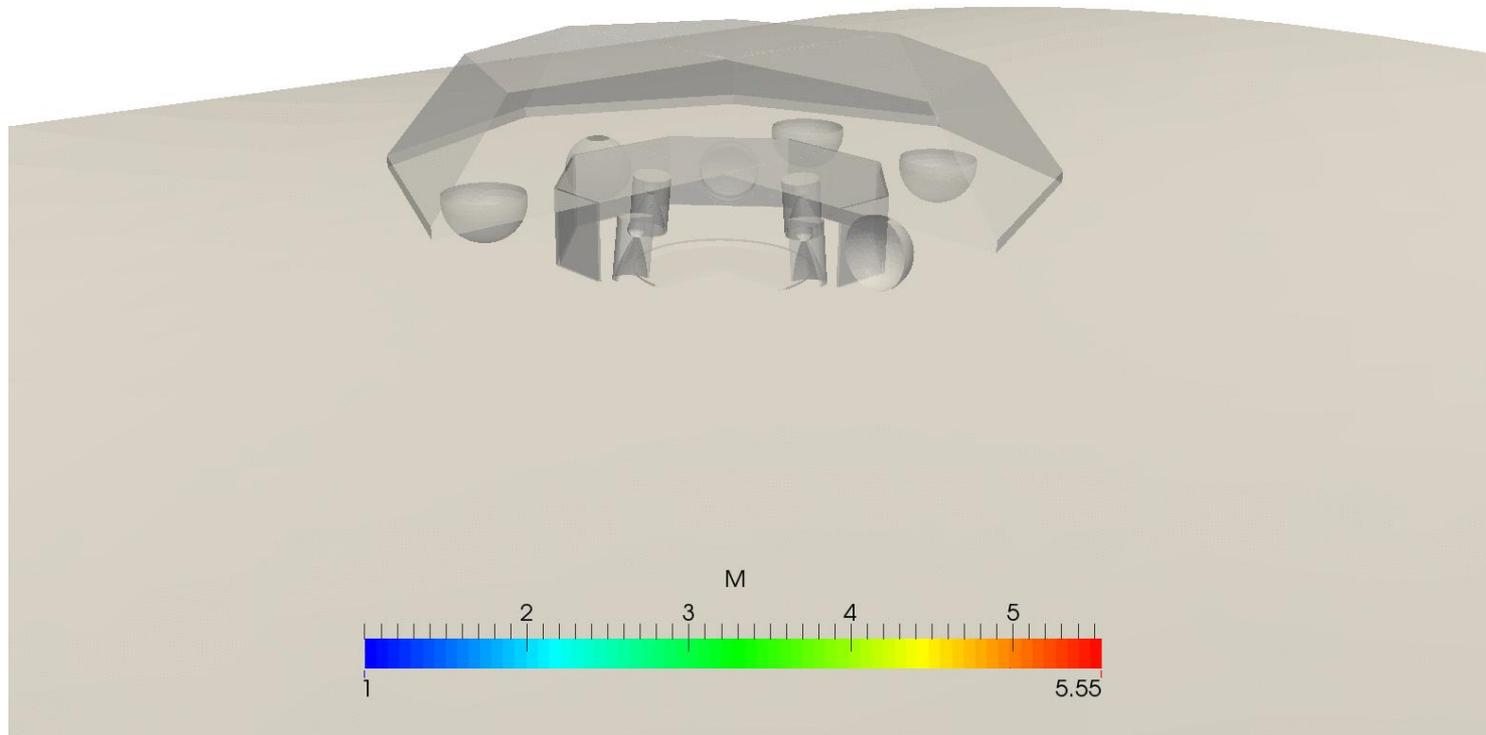


Рис.10 – Изоповерхности числа Маха, максимальный режим ДУ

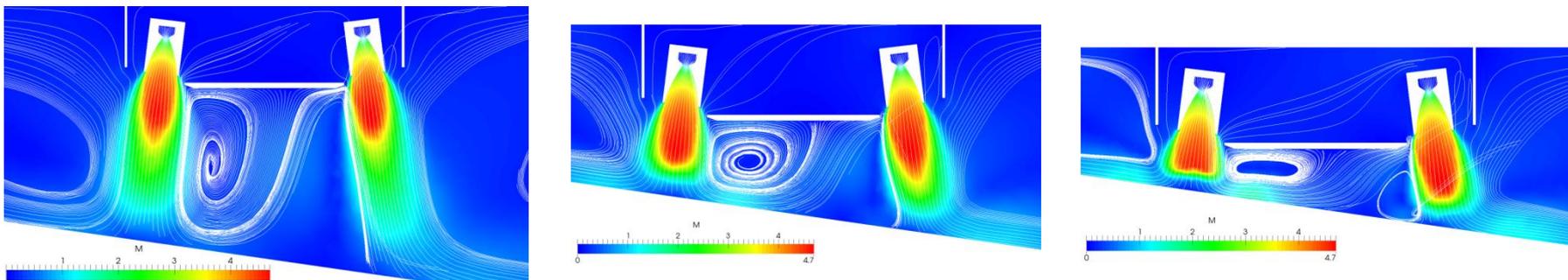


Рис.11 – Минимальный режим ДУ

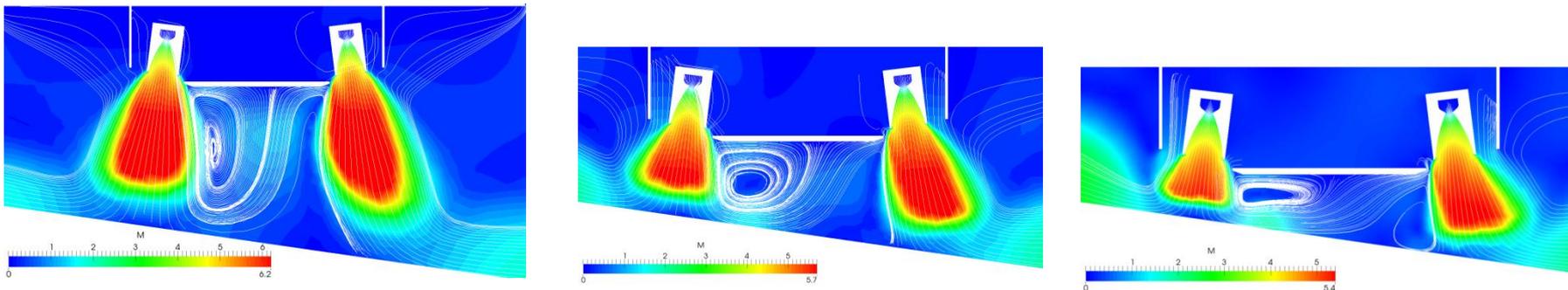


Рис.12 – Максимальный режим ДУ

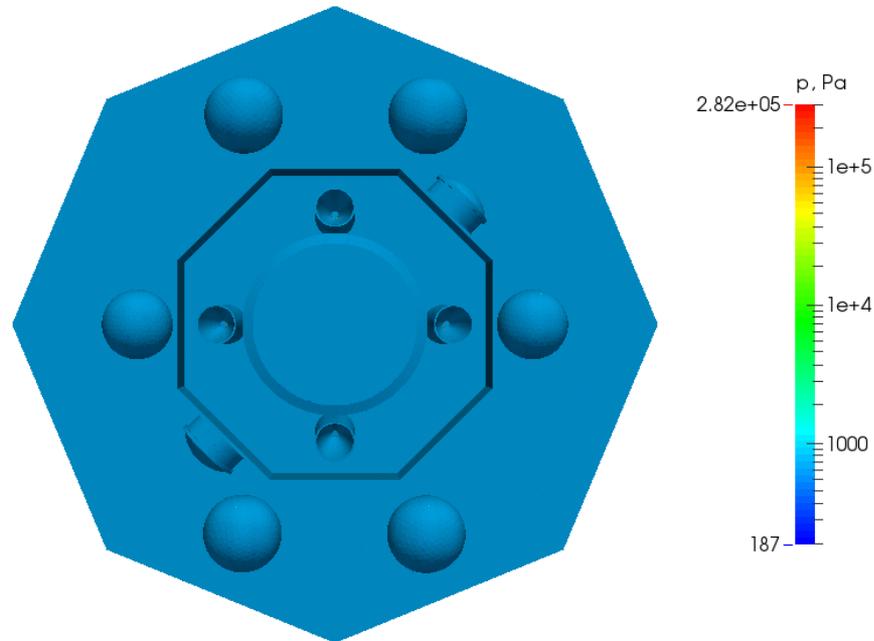


Рис.13 – Распределение параметров газа на поверхности ДМ,  
минимальный режим ДУ

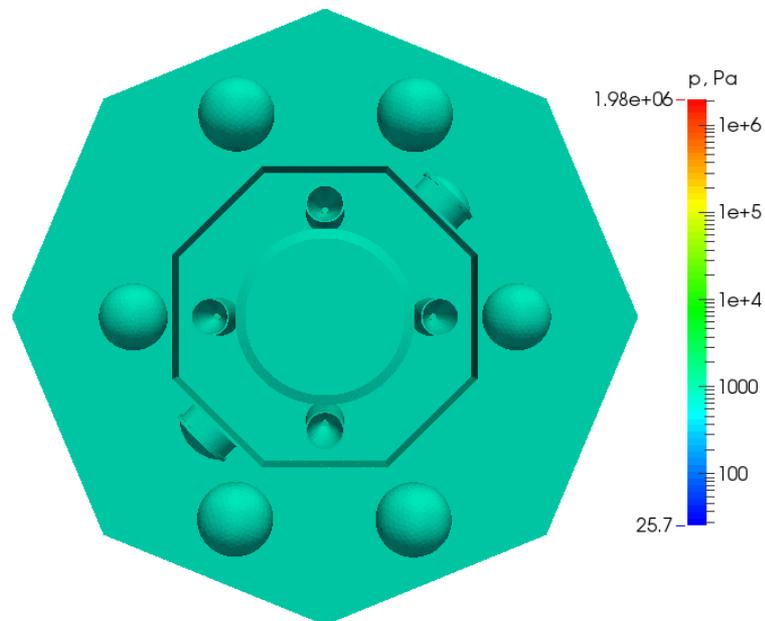


Рис.14 – Распределение параметров газа на поверхности ДМ,  
максимальный режим ДУ



# Результаты численных исследований

## Эффект «lift loss»

Таб. 2. Результаты расчетов силового воздействия струй ДУ на поверхность ПсМ-1 и ПсМ-2 и эффекта «lift loss»

$$L_f = \frac{G - G_0}{P}$$

Режим ДУ	Минимальный			Максимальный		
Высота, м	1.0	0.5	0.3	1.0	0.5	0.3
<b>ПсМ-1</b>						
$G_0$ , Н	1521			1466		
$G$ , Н	1488	1700	1879	1068	2132	5166
$L_f$	-0.016	0.08	0.18	-0.028	0.048	0.268
<b>ПсМ-2</b>						
$G_0$ , Н	5017			4635		
$G$ , Н	5055	4959	4941	3871	5657	7749
$L_f$	0.0192	-0.0296	-0.0384	-0.056	0.072	0.224

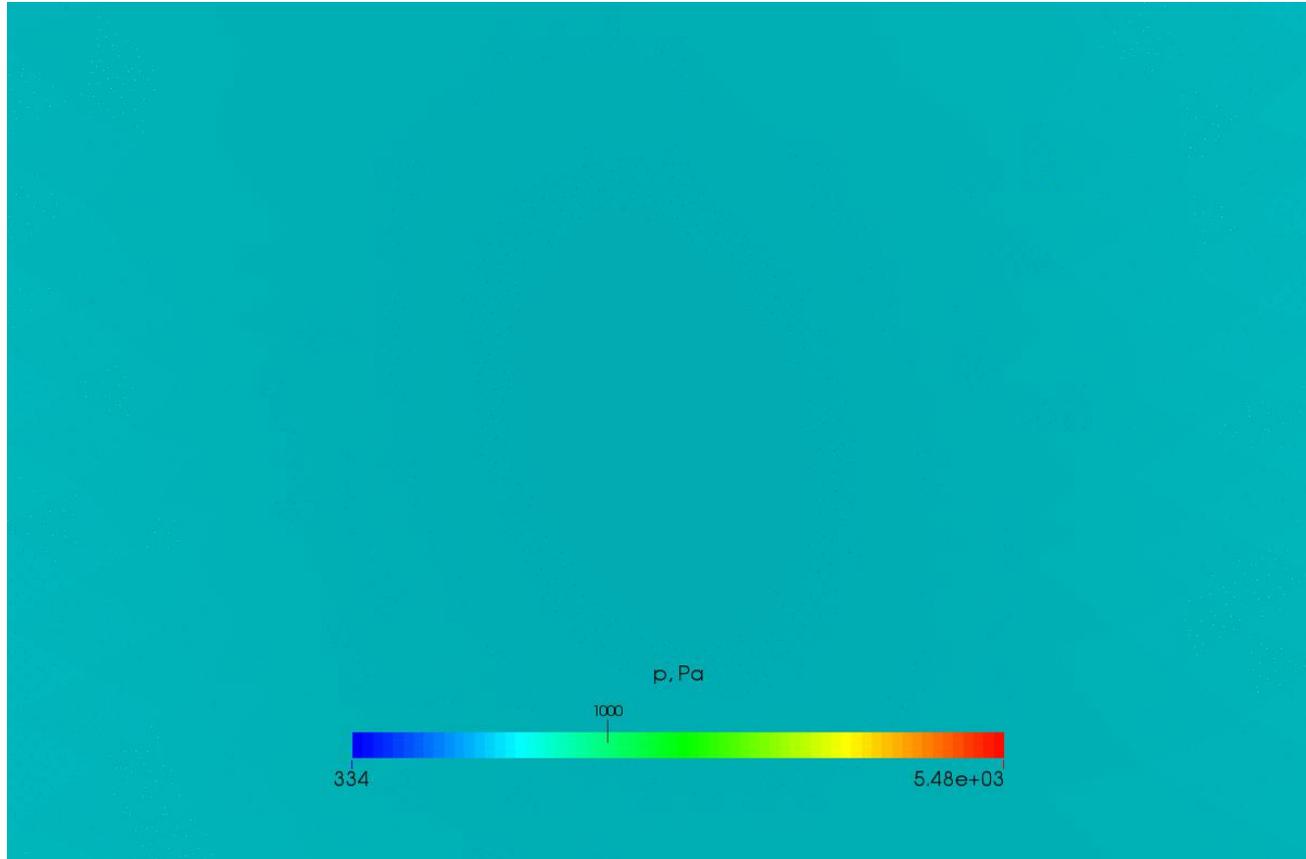


Рис.15 – Распределение параметров газа на поверхности Марса, минимальный режим ДУ



# Результаты численных исследований

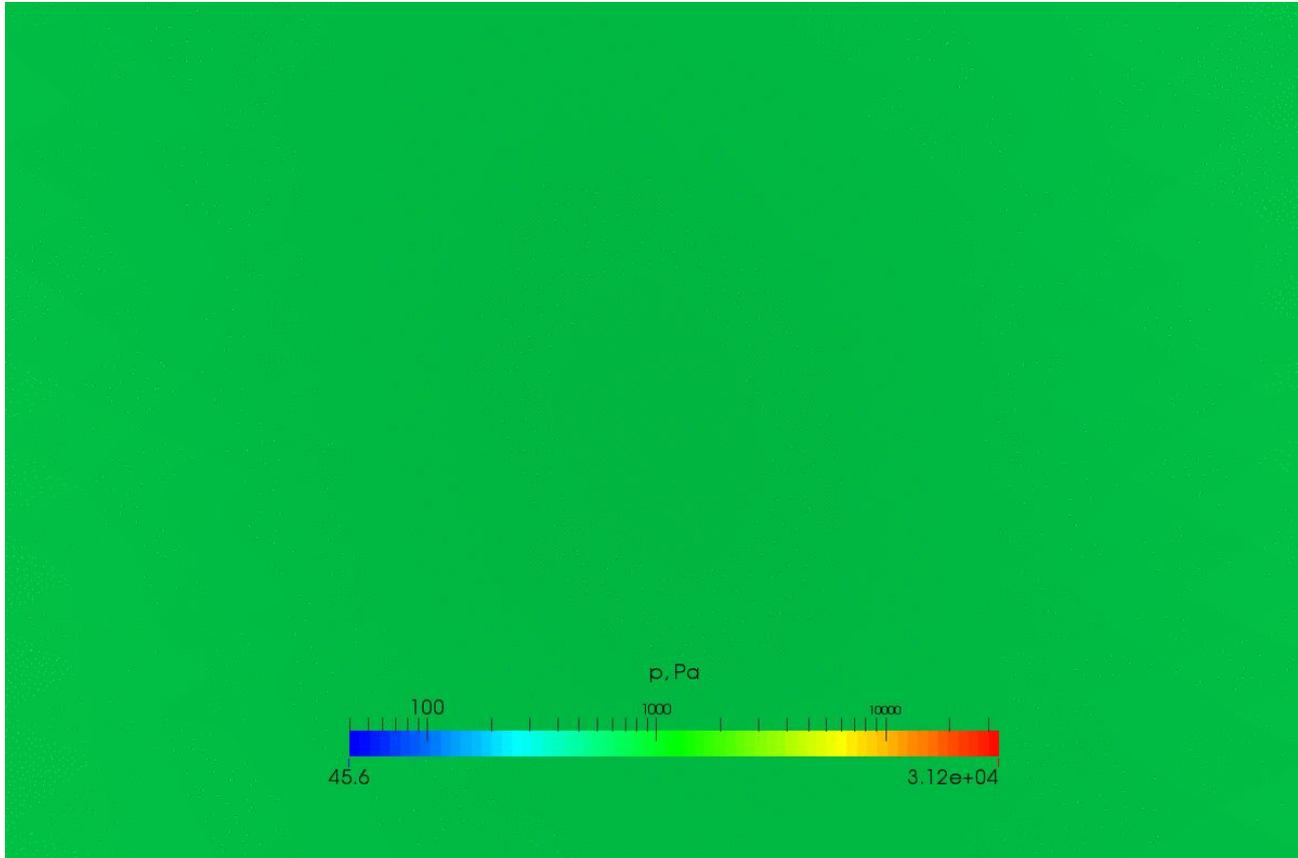


Рис.16 – Распределение параметров газа на поверхности Марса, максимальный режим ДУ



# Результаты численных исследований

## Оценка эрозии грунта Марса

Таб. 3. – Типы и параметры марсианского грунта

Обозначение	Тип грунта	Угол внутреннего трения, градус	Удельное сцепление, кПа
$\tau_1$	Сыпучий	18	3
$\tau_2$	Комковатый	35	3
$\tau_3$	Кусковатый	30	11
$\tau_4$	Песок	30	1
$\tau_5$	Аналог	32.5	0.718

$$\tau = \sigma \tan(\varphi) + c,$$

$\sigma$  – нормальное давление;

$\varphi$  – угол внутреннего трения;

$c$  – удельное сцепление.

Mojava Mars Simulant оценки прочности на сдвиг в пределах  $\tau = 3-20$  кПа;

ES-1, ES-2 и ES-3 оценки прочности на сдвиг в пределах  $\tau = 5-20$  кПа.

*Golombek M. P. The Martian surface: Composition, mineralogy and physical properties / M. P. Golombek, A. F. C. Haldemann, R. A. Simpson, R. L. Fergason, N. E. Putzig, R. E. Arvidson, J. F. Bell III, M. T. Mellon // Cambridge Univer. Press, Cambridge Planetary Science. – 2008. – P. 468-498.*

*Демидов Н. Э. Грунт Марса: разновидности, структура, состав, физические свойства, буримость и опасность для посадочных аппаратов / Н. Э. Демидов, А. Т. Базилевский, Р. О. Кузьмин // Астрономический Вестник. – 2015. – Т. 49, № 4. – С. 243-261.*

*Hanley J. Mechanical strength of Martian analog soil / J. Hanley, M. T. Mellon, R. E. Arvidson // 45th Lunar and Planetary Science Conference. – 2014. – Abstract № 2879.*



# Результаты численных исследований

## Оценка эрозии грунта Марса

Таб. 4. – Значения касательных напряжений

Режим ДУ	Высота, м	Сыпучий $\tau_1$ , кПа	Комковатый $\tau_2$ , кПа	Кусковатый $\tau_3$ , кПа	Песок $\tau_4$ , кПа	Аналог $\tau_5$ , кПа
Минимальный	1.0	3.6	5.3	12.1	2.1	1.9
	0.5	4.4	6.9	13.4	3.4	3.4
	0.3	4.8	7.8	14.2	4.2	4.2
Максимальный	1.0	5	8.3	14.6	4.6	4.7
	0.5	8.4	15.7	20.6	10.6	11.3
	0.3	13	25.5	28.7	18.7	20.25

Mojava Mars Simulant оценки прочности на сдвиг в пределах  $\tau = 3-20$  кПа;  
ES-1, ES-2 и ES-3 оценки прочности на сдвиг в пределах  $\tau = 5-20$  кПа.

Hanley J. Mechanical strength of Martian analog soil / J. Hanley, M. T. Mellon, R. E. Arvidson // 45th Lunar and Planetary Science Conference. – 2014. – Abstract № 2879.

Brunskill C. Characterisation of Martian Soil Simulants for the ExoMars rover testbed / C. Brunskill, N. Patel, T. P. Gouache, G. P. Scott, C. M. Saaj, M. Matthews, L. Cui // Journal of Terramechanics. – 2010. – V. 48. –P. 419-438.



# Результаты численных исследований

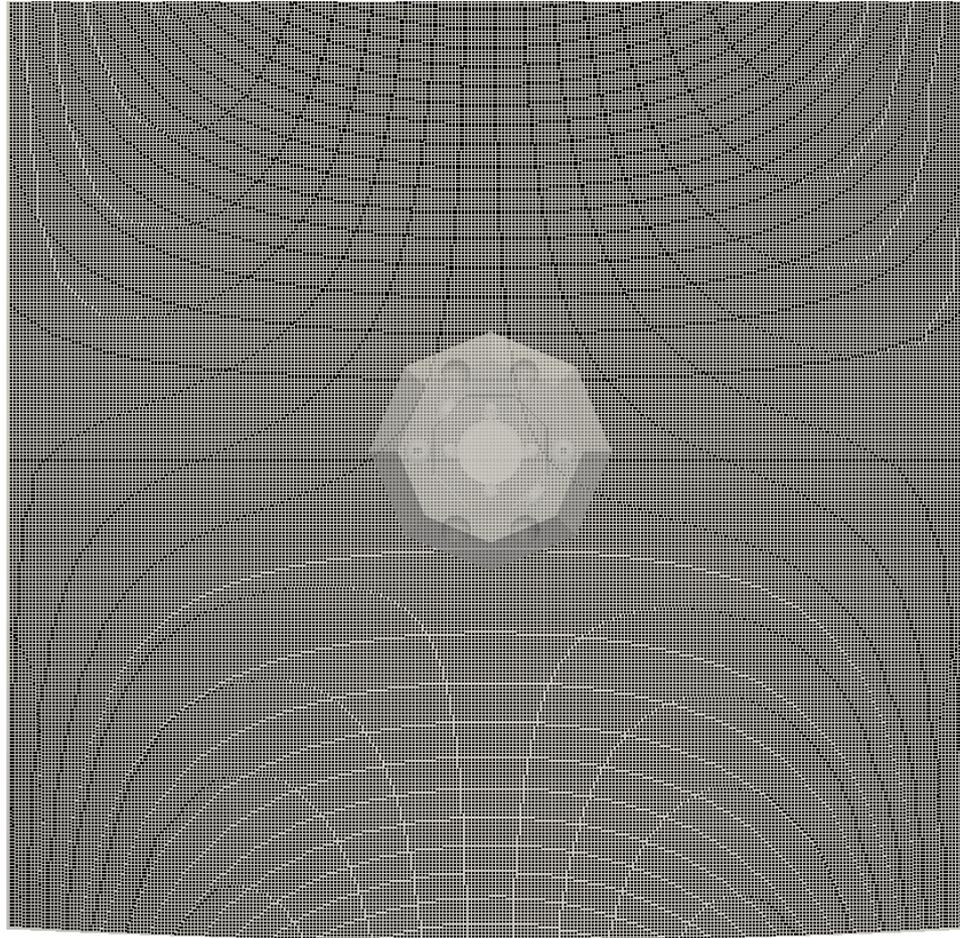


Рис.17 – Минимальный режим ДУ, диаметр частицы 10 мкм

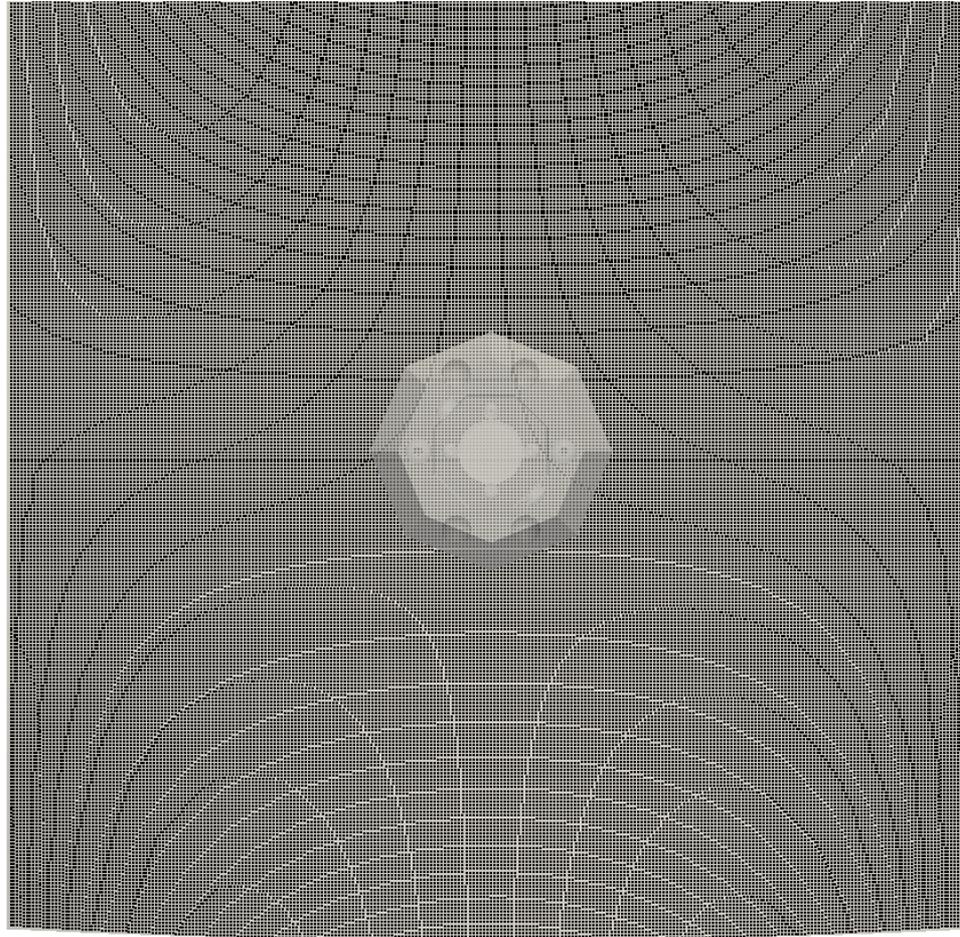


Рис.18 – Минимальный режим ДУ, диаметр частицы 100 мкм



# Результаты численных исследований

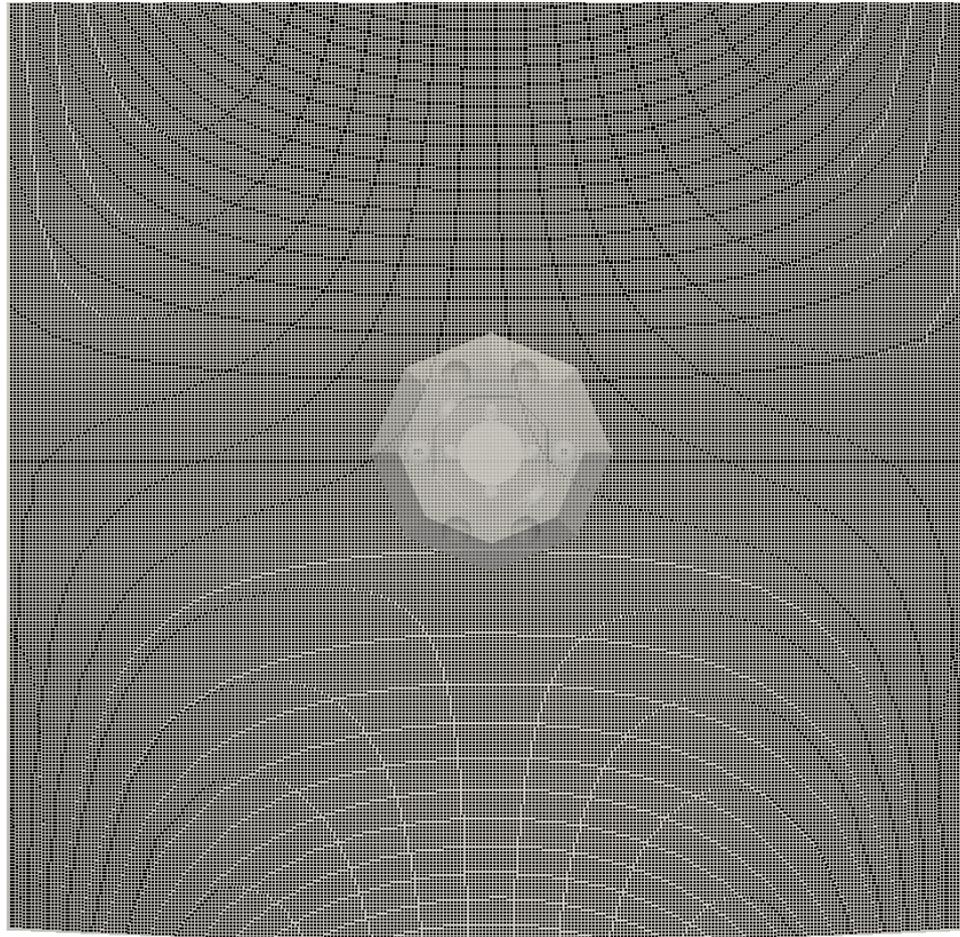


Рис.19 – Минимальный режим ДУ, диаметр частицы 1000 мкм

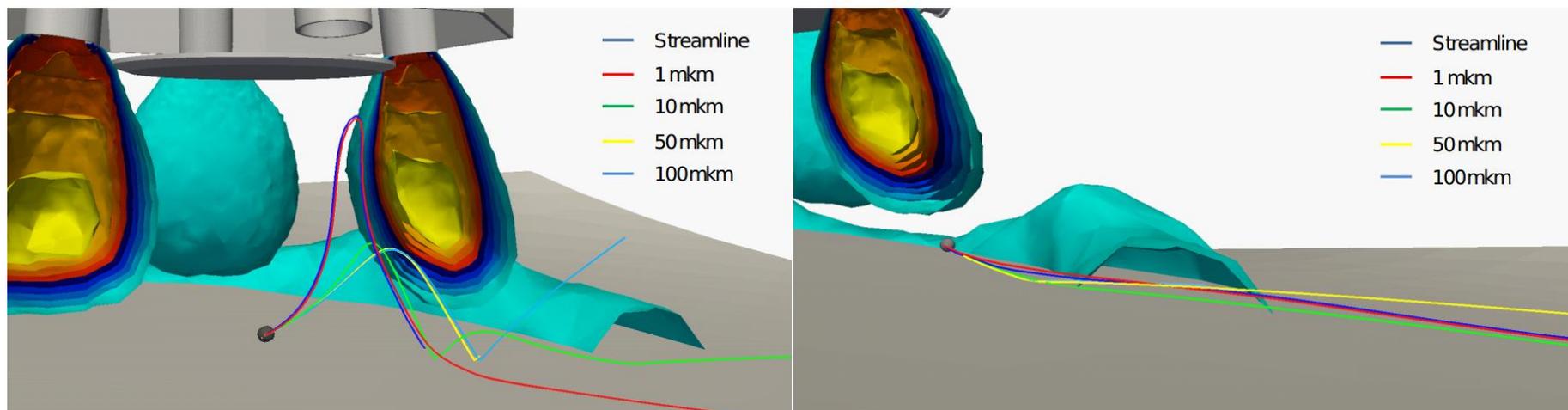


Рис.20 – Минимальный режим ДУ, пробная частица



# Заключение

- Проведено трехмерное математическое моделирование заключительного этапа мягкой посадки КА «ЭкзоМарс» с использованием суперкомпьютера ТГУ СКИФ Cyberia.
- Выполнено сравнение производительности параллельных вычислений с использованием Bare Metal, KVM и Docker на примере решателя OpenFOAM для решения задач газовой динамики.
- Исследован эффект Lift Loss в условиях Марса.
- Проведены оценки возможной эрозии грунта Марса в результате силового воздействия сверхзвуковых струй ДУ ПсМ «ЭкзоМарс».
- Исследовано движение твердых частиц грунта Марса.



Национальный  
исследовательский

Томский  
государственный  
университет



Суперкомпьютерные  
дни в России 2019

# Спасибо за внимание

- <https://vk.com/openfoam>
- `docker pull akad/openfoam-ext-40-paraview`
- `instagram @anuarkagenov`