

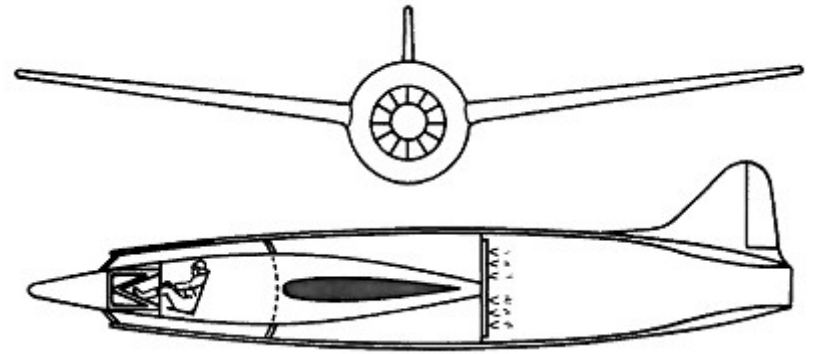
# **Моделирование прямоточных воздушно-реактивных двигателей с помощью метода РРМ**

Егорова Е.В.

НИИСИ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова

2013

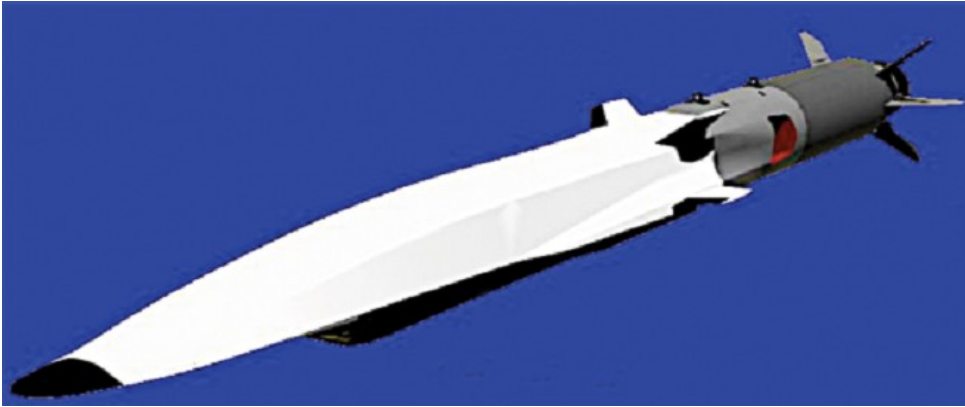
1913 Рене Лорен  
1926 Бенжамин Картер  
1929 Б.С. Стечкин  
1934 Рене Ледюк  
1939 И.А. Меркулов



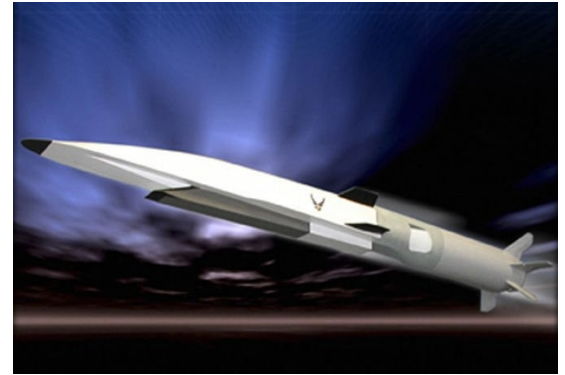
**V-1**



**Ледюк-010**



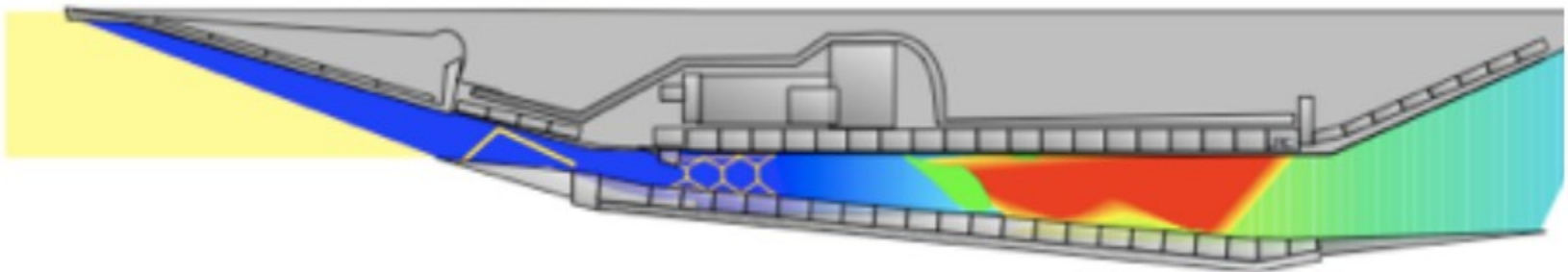
X-51A



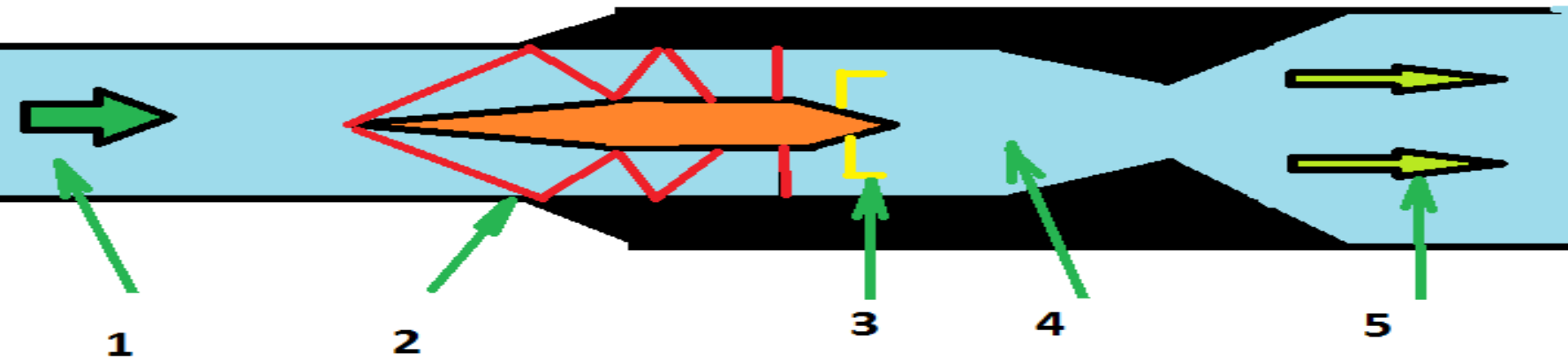
X-43A



Ty-2000



# Схема ПВРД



1. Встречный поток воздуха
2. Система косых скачков
3. Топливные форсунки
4. Камера сгорания
5. Реактивная струя

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i) = 0$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho v_i v_j + P \delta_{ij}) = 0$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [(e + P) v_i] = 0$$

$$P = (\gamma - 1) \varepsilon$$

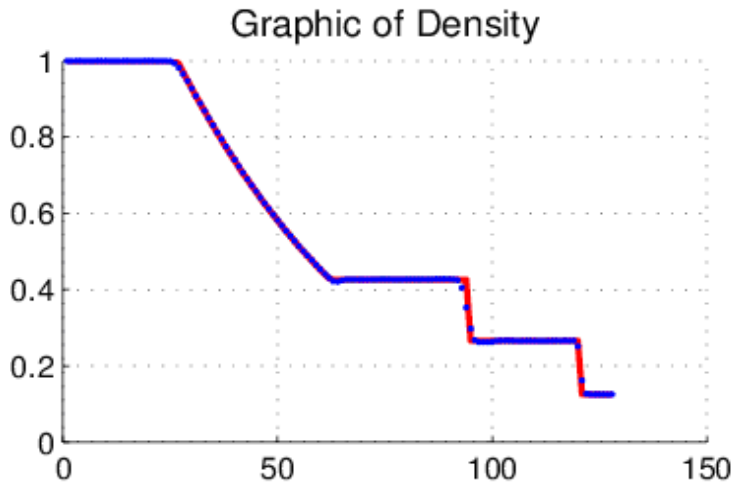
$$a_{j+1/2} = \frac{7}{12} (a_j^n + a_{j+1}^n) - \frac{1}{12} (a_{j+2}^n + a_{j-1}^n).$$

$$a_{L,j} \rightarrow a_j^n, \quad a_{R,j} \rightarrow a_j^n \quad \text{if } (a_{R,j} - a_j^n)(a_j^n - a_{L,j}) \leq 0$$

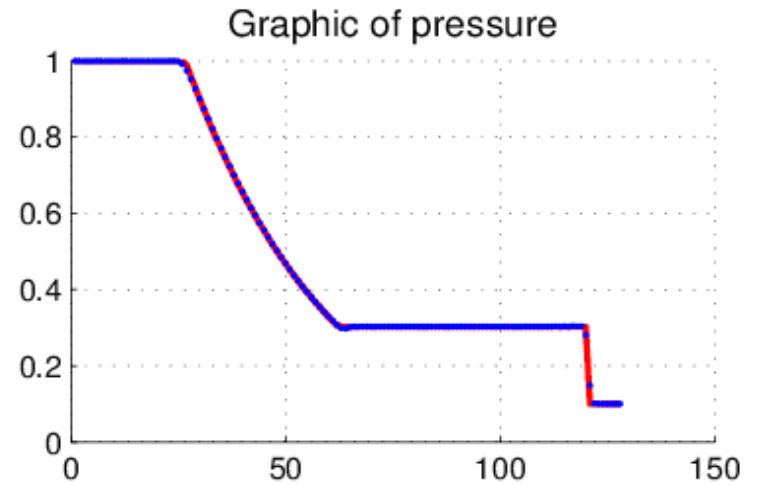
$$a_{L,j} \rightarrow 3a_j^n - 2a_{R,j} \quad \text{if } (a_{R,j} - a_{L,j}) \left( a_j^n - \frac{1}{2} (a_{L,j} + a_{R,j}) \right) > \frac{(a_{R,j} - a_{L,j})^2}{6}$$

$$a_{R,j} \rightarrow 3a_j^n - 2a_{L,j} \quad \text{if } -\frac{(a_{R,j} - a_{L,j})^2}{6} > (a_{R,j} - a_{L,j}) \left( a_j^n - \frac{1}{2} (a_{R,j} + a_{L,j}) \right)$$

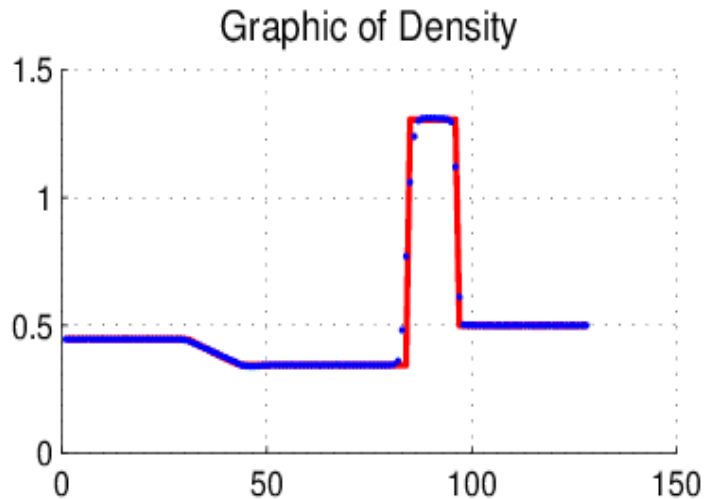
$$a_j^{n+1} = a_j^n + u \frac{\Delta t}{\Delta \xi_j} (\bar{a}_{j-1/2} - \bar{a}_{j+1/2})$$



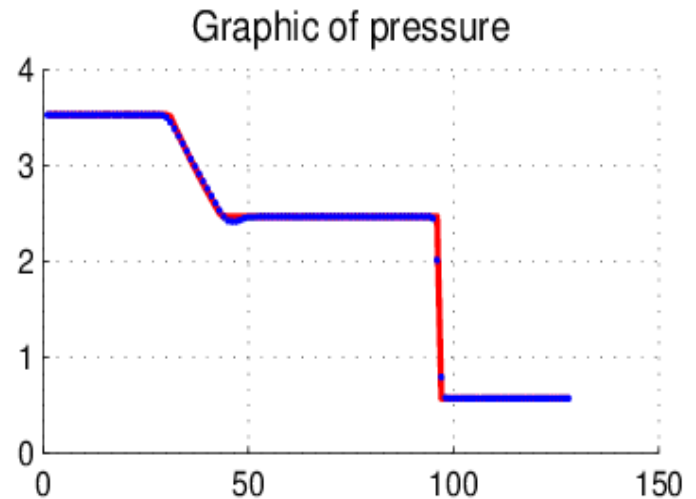
$$(\rho^L, v^L, P^L) = (1, 0, 1)$$



$$(\rho^R, v^R, P^R) = (0.125, 0, 0.1)$$



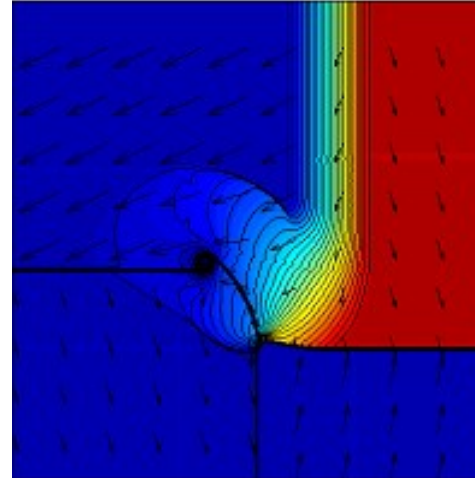
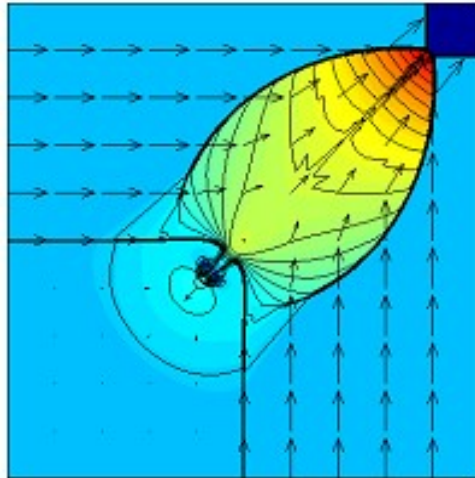
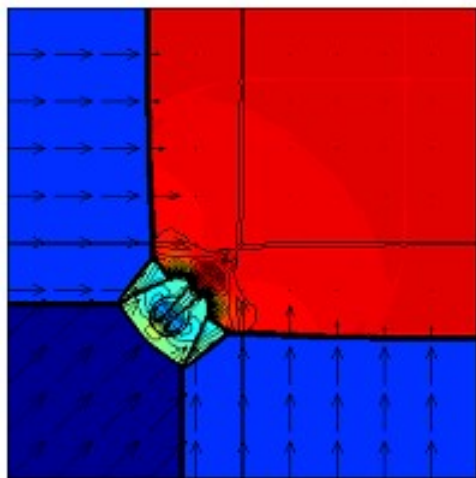
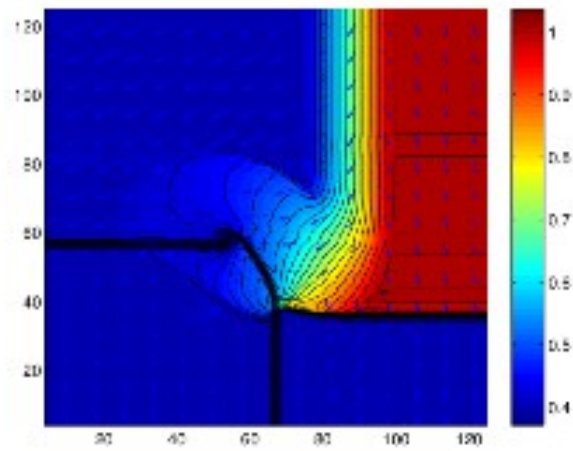
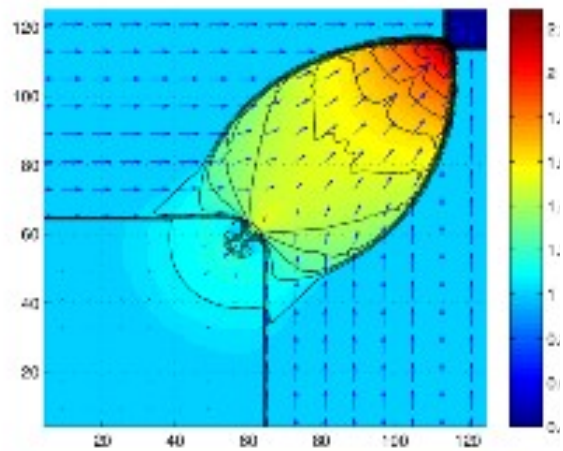
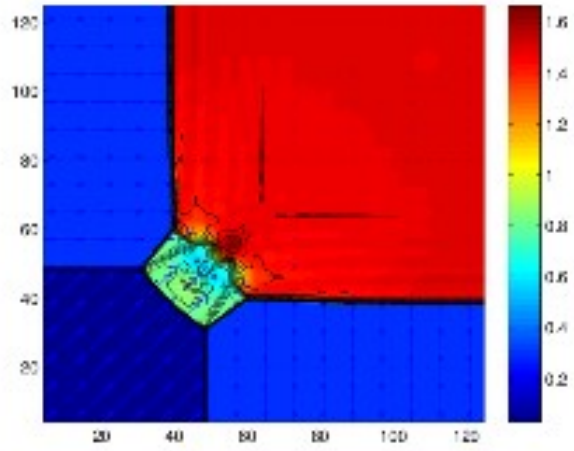
$$(\rho^L, v^L, P^L) = (0.445, 0.698, 3.528),$$

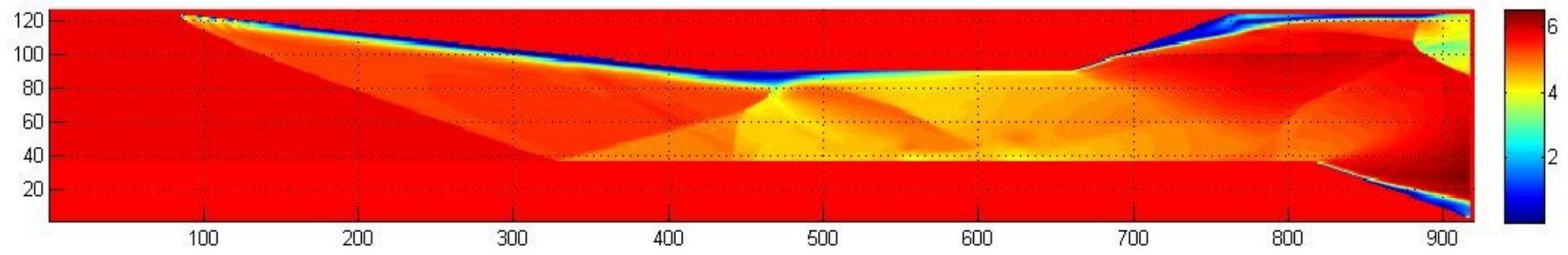
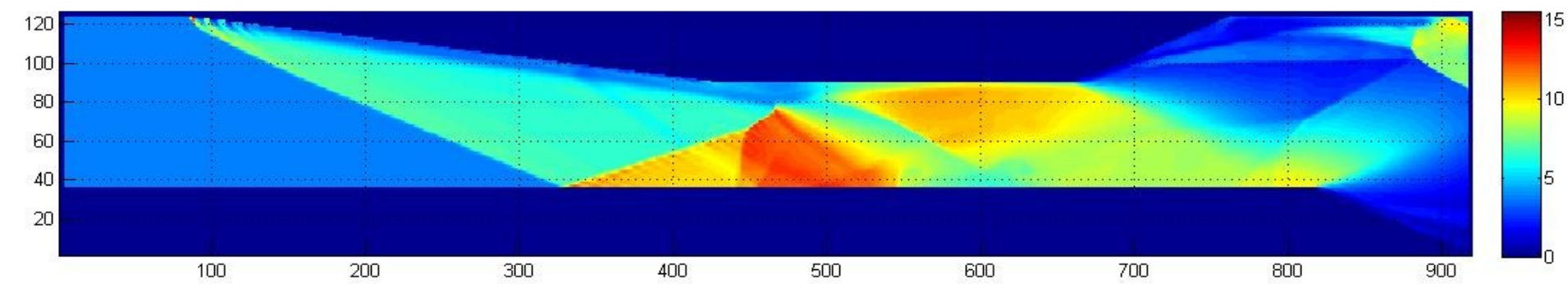
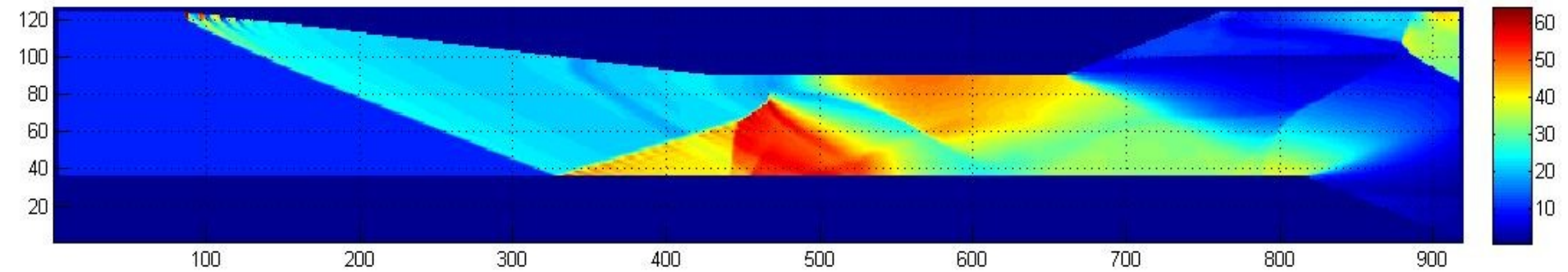


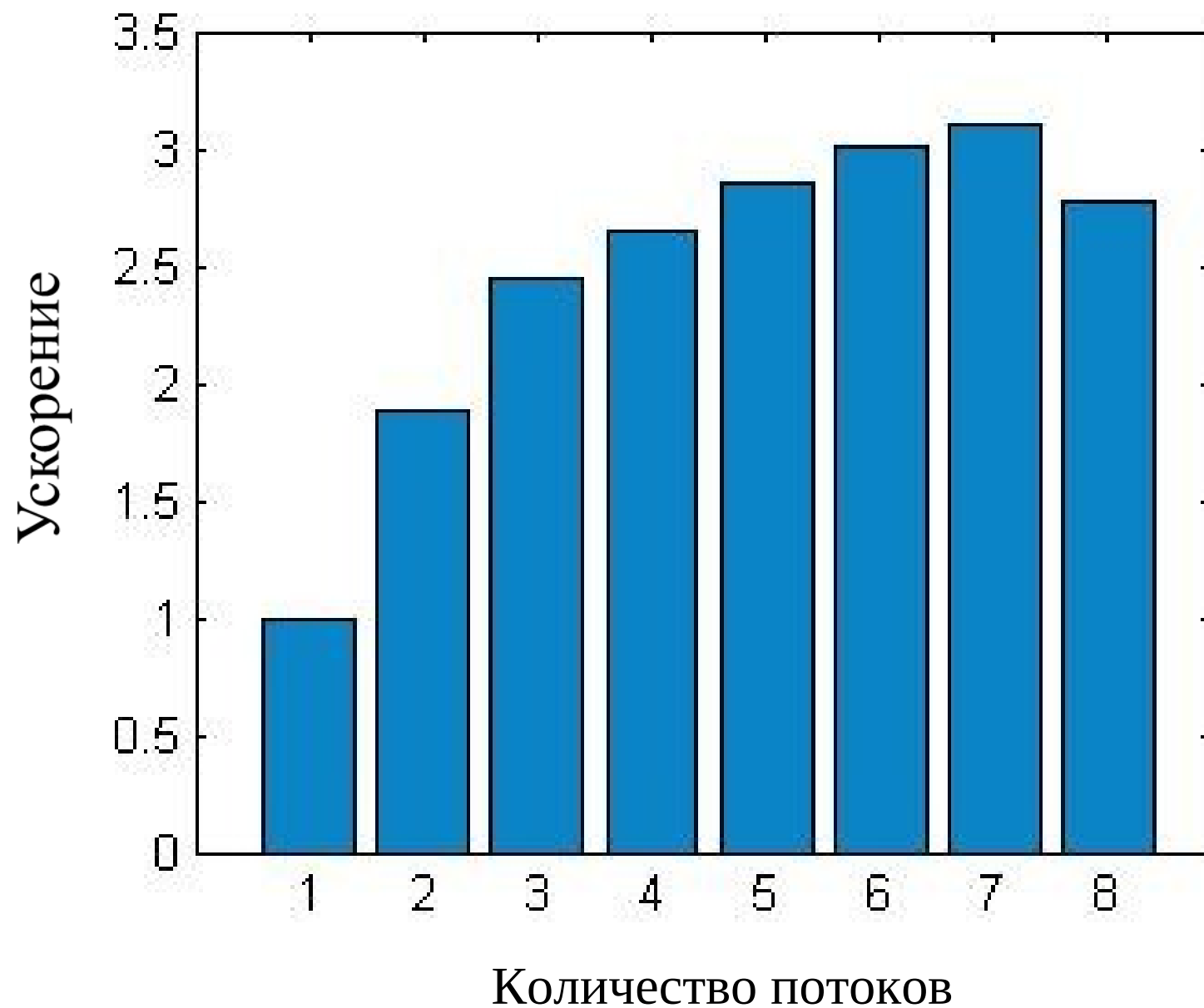
$$(\rho^R, v^R, P^R) = (0.5, 0, 0.571),$$

Case	Left				Right				T
	$p$	$\rho$	$u$	$v$	$p$	$\rho$	$u$	$v$	
3	0.3	0.5323	1.206	0.0	1.5	1.5	0.0	0.0	0.3
	0.029	0.138	1.206	1.206	0.3	0.5323	0.0	1.206	
4	0.35	0.5065	0.8939	0.0	1.1	1.1	0.0	0.0	0.25
	1.1	1.1	0.8939	0.8939	0.35	0.5065	0.0	0.8939	
6	1.0	2.0	0.75	0.5	1.0	1.0	0.75	-0.5	0.3
	1.0	1.0	-0.75	0.5	1.0	3.0	-0.75	-0.5	
12	1.0	1.0	0.7276	0.0	0.4	0.5313	0.0	0.0	0.25
	1.0	0.8	0.0	0.0	1.0	1.0	0.0	0.7276	
15	0.4	0.5197	-0.6259	-0.3	1.0	1.0	0.1	-0.3	0.2
	0.4	0.8	0.1	-0.3	0.4	0.5313	0.1	0.4276	
17	1.0	2.0	0.0	-0.3	1.0	1.0	0.0	-0.4	0.3
	0.4	1.0625	0.0	0.2145	0.4	0.5197	0.0	-1.1259	









## ЛИТЕРАТУРА:

- 1.S.K.Godunov,A.V.Zabrodin, and G.P.Prokorov, U.S.S.R. Computational Math. And Math. Phys. 1(1961), 1187.
- 2.B. Van Leer, J. Comput. Phys. 32 (1979), 101.
- 3.P. COLELLA, A direct Eulerian MUSCL scheme for gas dynamics, SIAM J. Sci. Statist. Comput., in press
- 4.P. COLELLA and PAUL R. WOODWARD, The Piecewise Parabolic Method (PPM) for Gas-Dynamical Simulations, JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS 54, 174-201 (1984)
- 5.R. LISKA AND B. WENDROF, COMPARISON OF SEVERAL DIFFERENCE SCHEMES ON 1D AND 6.2D TEST PROBLEMS FOR THE EULER EQUATIONS, SIAM J. SCI. COMPUT, Vol. 25, No. 3, pp. 995–1017
- 7.Б.П. Рыбакин, Н.И. Шидер. Построение параллельных алгоритмов для решения задач гравитационной газовой динамики. Журнал Вычислительные Методы и Программирование, **11**, 2010, стр. 388-394.
- 8.B. Rybakin. Modeling of III-D Problems of Gas Dynamics on Multiprocessing Computers and GPU. Elsevier, Computers & Fluids, DOI information: 10.1016/j.compfluid.2012.01.016, 31-JAN-2012.
- 9.Б.П. Рыбакин, Л.И. Стамов. Использование многопроцессорных вычислительных систем и графических ускорителей для моделирования задач газодинамики // Материалы международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: экзафлопсное будущее», г. Новороссийск, 19-24 сентября 2011 г., стр. 84-89.
- 10.Б.П. Рыбакин, Е.В. Егорова. Решение задач газовой динамики на графических ускорителях // Материалы международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: экзафлопсное будущее», г. Новороссийск, 19-24 сентября 2011 г., стр. 326-331.

**Спасибо за  
внимание!**

