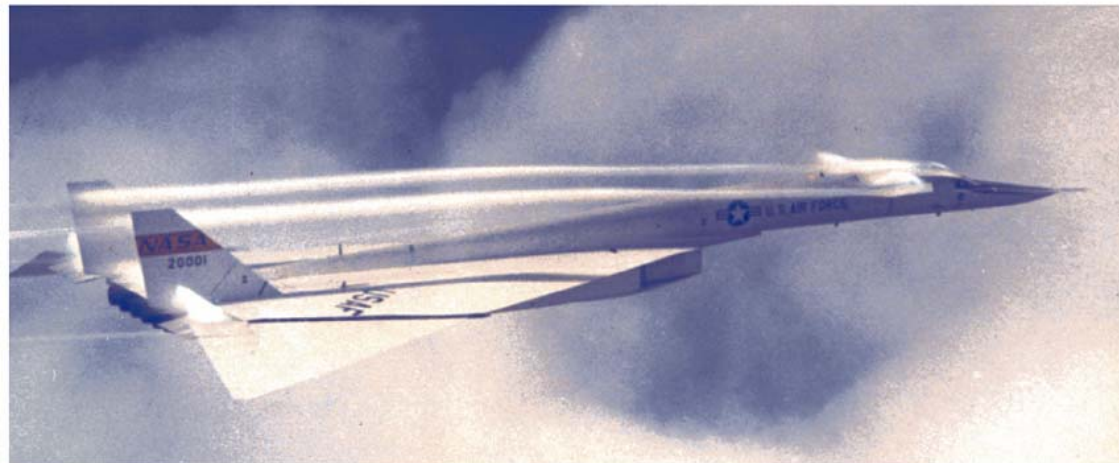
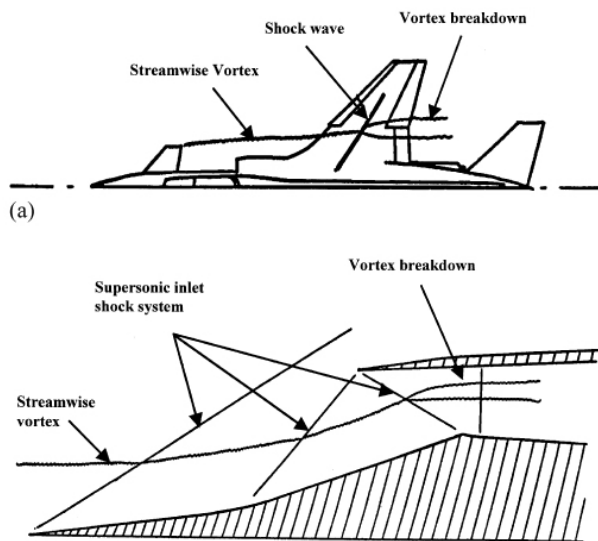


МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ В СЛЕДЕ ЗА КРЫЛОМ И ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПЕРЕСЕКАЮЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

А. А. Давыдов, А. Е. Луцкий



Московский Суперкомпьютерный Форум 2014
Москва 21 октября 2014 года

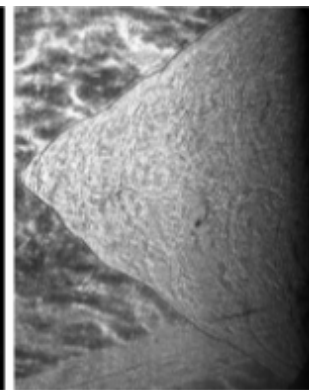
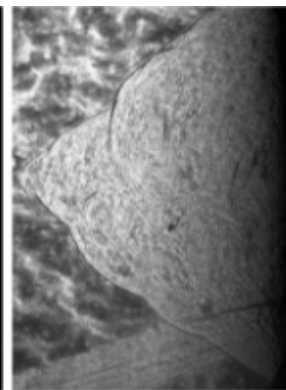
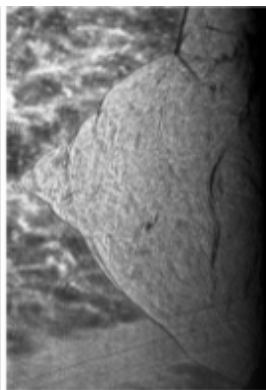
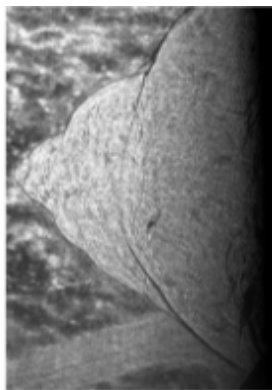
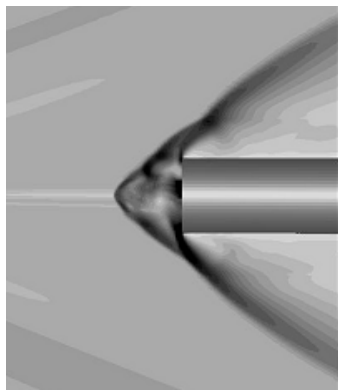


Photograph of XB-70 in supersonic flight.

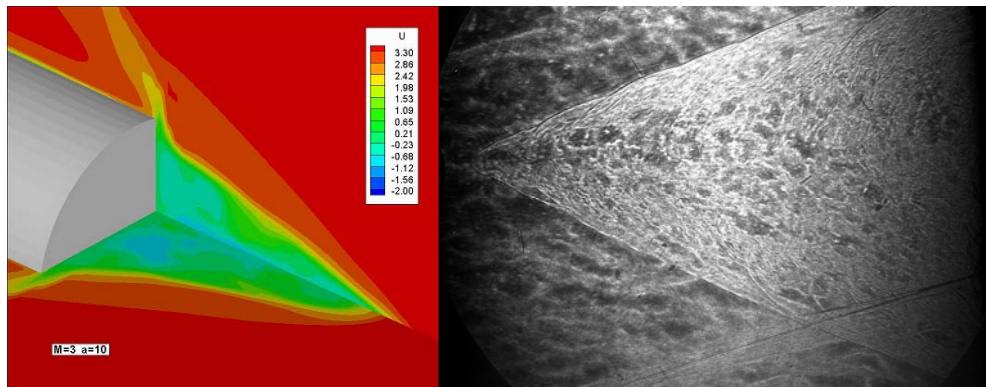
1. **Zatoloka V.V., Ivanyushkin A.K., Nikolayev A.V** *Fluid Mechanics, Soviet Research*, 1978, vol. 7, pp. 153-158.
2. **Delery J., Horowitz E., Leuchter O., Solignac J** *La Recherche Aerospatiale*, (English ed.), 1984, pp. 1-24.
3. **Glotov G.F** *Uchenie zapiski TsAGI*, 1989, vol. 20, No. 5, (in Russian).
4. **Ivanyushkin A.K., Korotkov Yu.V., Nikolayev A.V.** *Uchenie zapiski TsAGI*, 1989, vol. 20, No. 5, (in Russian).
5. **Cattafesta L. , Settles G.** Experiments on shock/vortex interaction. AIAA Paper, No. 0315, 1992.
6. **Kalkhoran I.M., Smart M.K., Betti A** *AIAA Journal*, 1996, vol. 3, No. 34, pp. 1855-1861.
7. **Borovoy V.Ja., Kubishina T.V., Skuratov A.S., Yakovleva L.S** *Mechanica zhidkosti i gaza*, 2000, No. 5, pp. 66-76

Режимы взаимодействия вихревого следа с головным скачком уплотнения

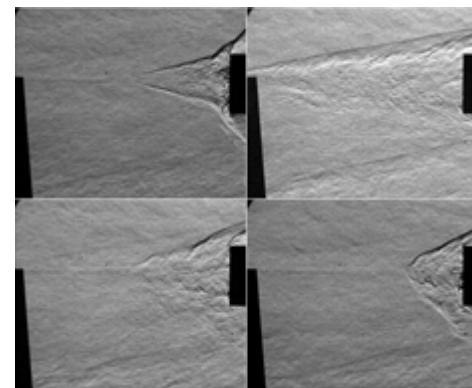
Пульсирующий режим



С конической зоной взаимодействия



Автоколебания

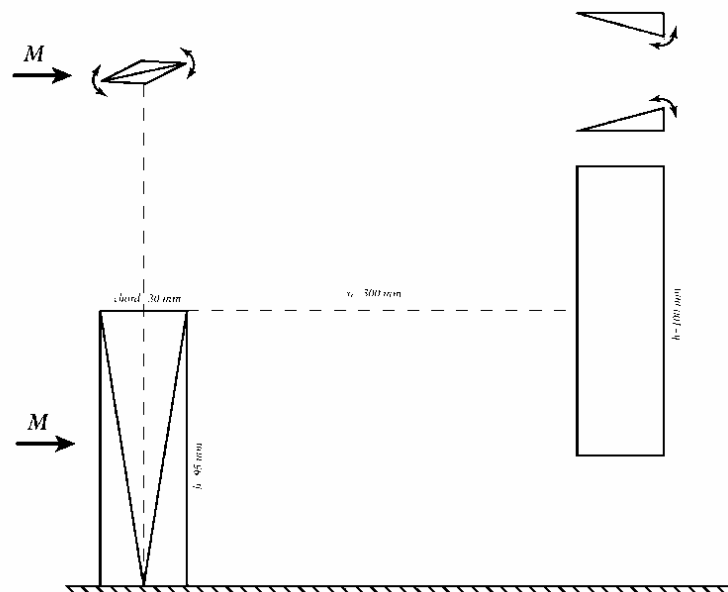


A.M. Shevchenko, I.N. Kavun, A.A. Pavlov, Al.A. Pavlov, A. S. Shmakov, V.I Zapryagaev. Unsteady effects in wing wake / shock interactions. Proc of 2nd European Conference for Aerospace Sciences, Brussels, 1- 6 July, 2007, Paper No. 2.01.03., 8p.

А.А.Давыдов, А.В.Забродин, А.Б.Карагичев, А.Е.Луцкий, А.М.Харитонов, А.М.Шевченко.

Simulation of the interaction of the wing tip vortex with the bow shock. XIV International Conference on the Methods of Aerophysical Research, Novosibirsk, 2008

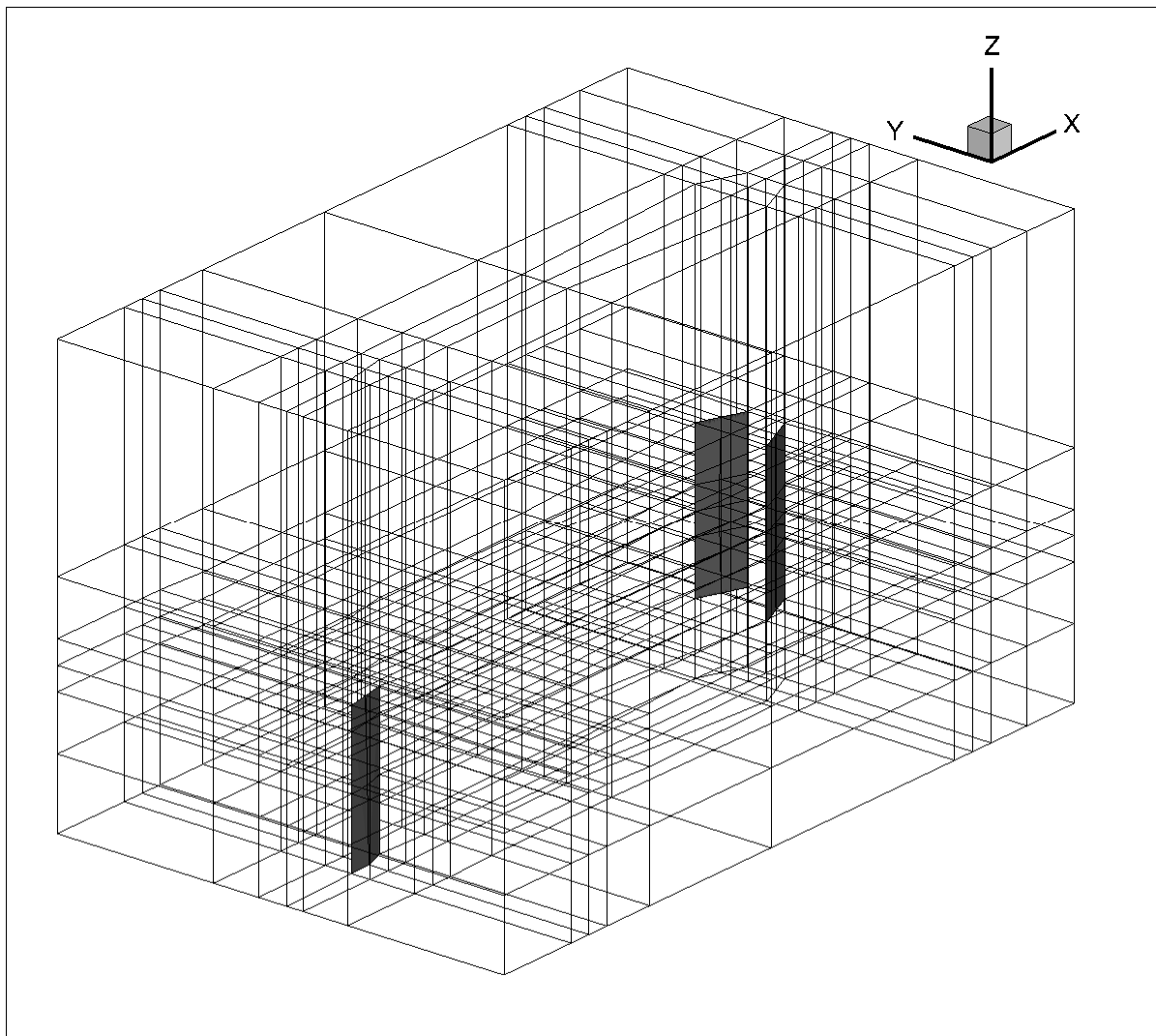
Схема эксперимента



Эксперимент: Труба Т-325 ИТПМ СО РАН

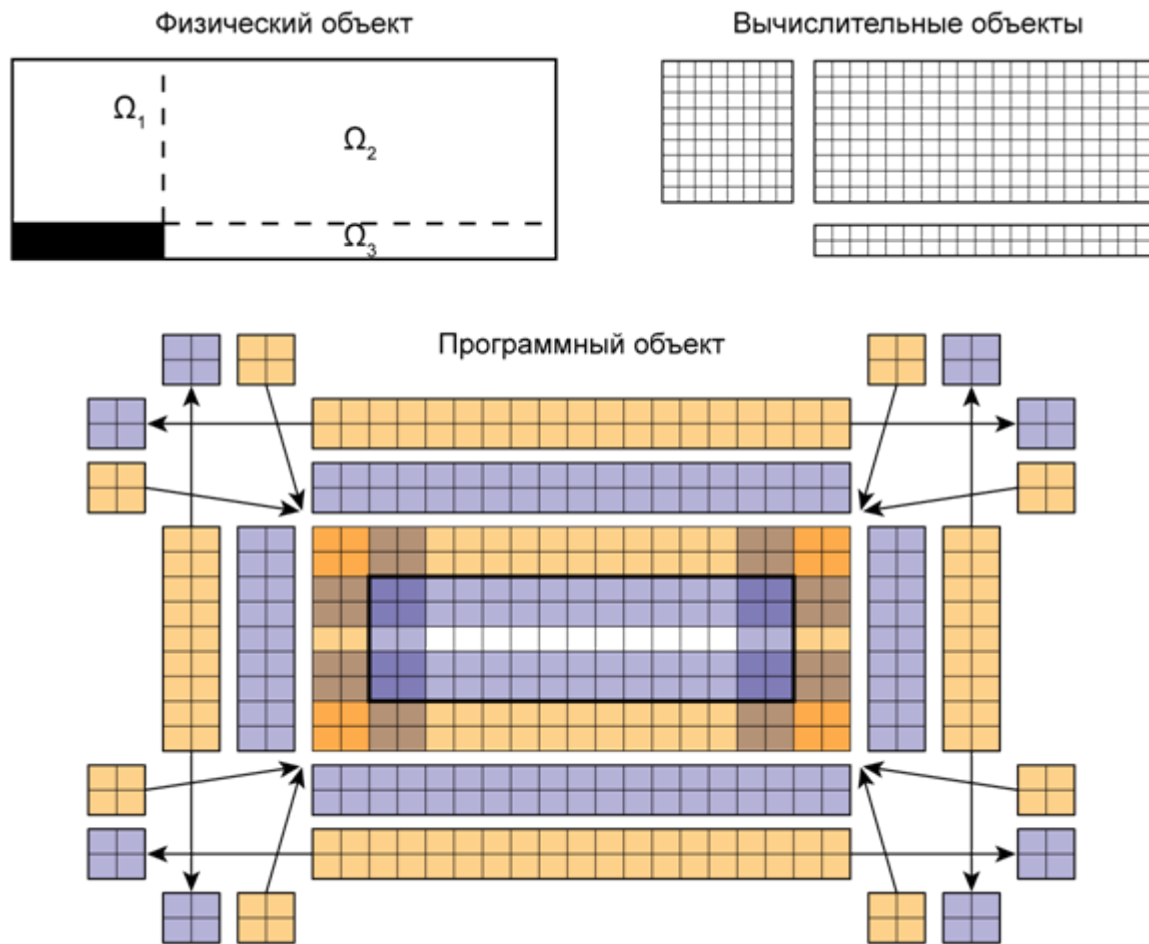
$M=3$, $\alpha=0\div 10^\circ$, $\beta=15\div 25^\circ$ (А.М.Харитонов, А.М.Шевченко, А.С.Шмаков)

Визуализация: Теневой метод с использованием адаптивных визуализирующих транспарантов (М. П. Голубев, Ал. А. Павлов)

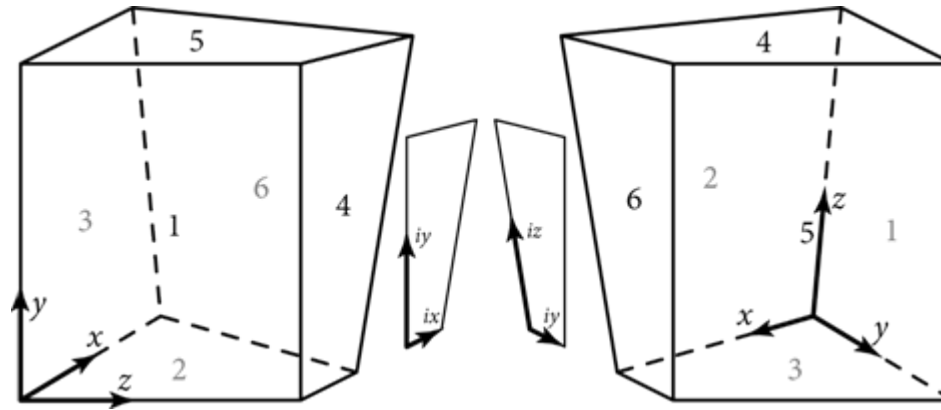


Многоблочная сетка. Число ячеек 18 667 500
RANS, модель турбулентности Спаларта-Алмареса

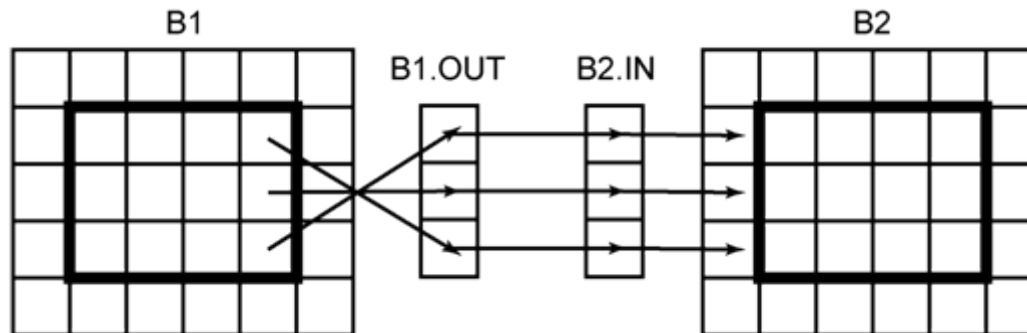
Параллельная реализация



Параллельная реализация: обмен между блоками



Взаимное расположение блоков



Обмен данными между блоками – накладные расходы

Параллельная реализация: ускорение, масштабируемость

Ускорение расчетов с GPU в зависимости от размера блока

Размер блока	4050	11070	12690	19215	37515	43005	52521	101199	117547	197579
Время GPU	11	18	18	17	23	23	23	44	46	69
Время CPU	29	79	96	142	283	323	407	810	978	1700
Ускорение	2,6	4,4	5,3	8,4	12,3	14,0	17,7	18,4	21,3	24,6

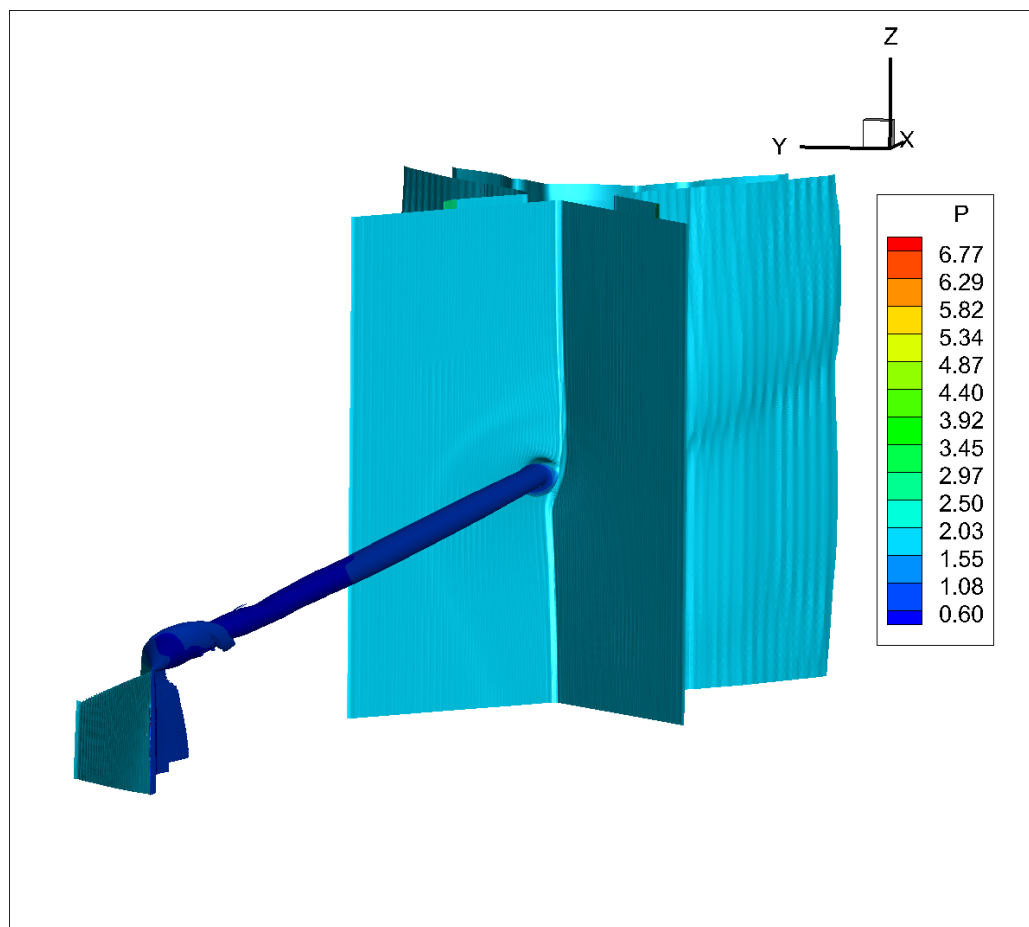
«Сильная» масштабируемость

Количество GPU (узлов на K-100)	1 (1)	3 (1)	9 (3)	27 (9)
Время	27,90	9,88	3,58	1,35
Ускорение	1,00	2,82	7,79	20,67
Эффективность, [%]	100,00	94,13	86,59	76,54

Совместное использование GPU и CPU-ядер

	1 узел K-100		2 узла K-100	
	3GPU	3GPU+8CPU	6GPU	6GPU+16CPU
Время	65.98	47.72	38.8	28.15
ускорение		1.38		1.37

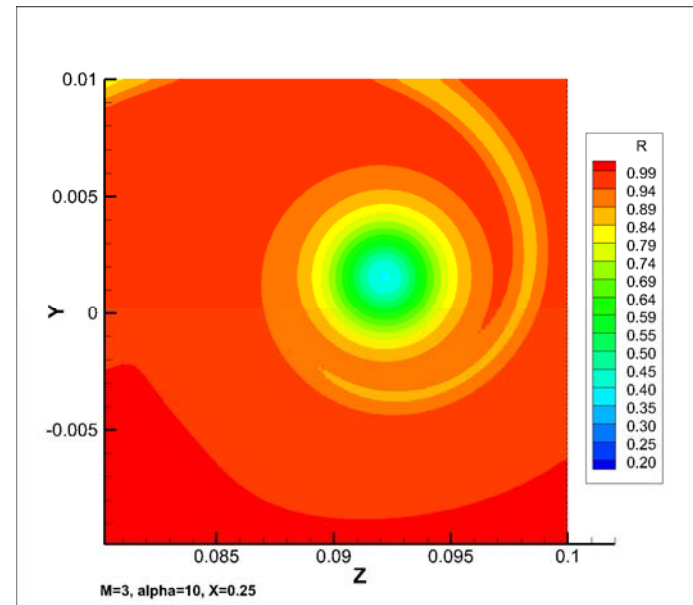
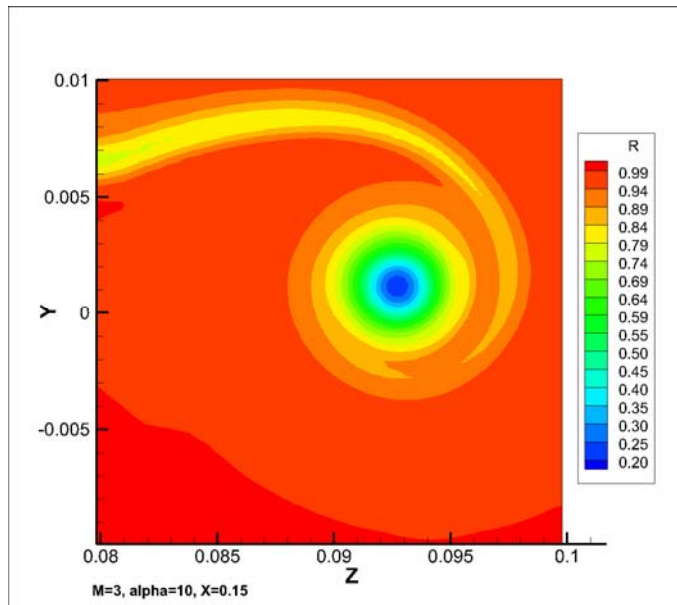
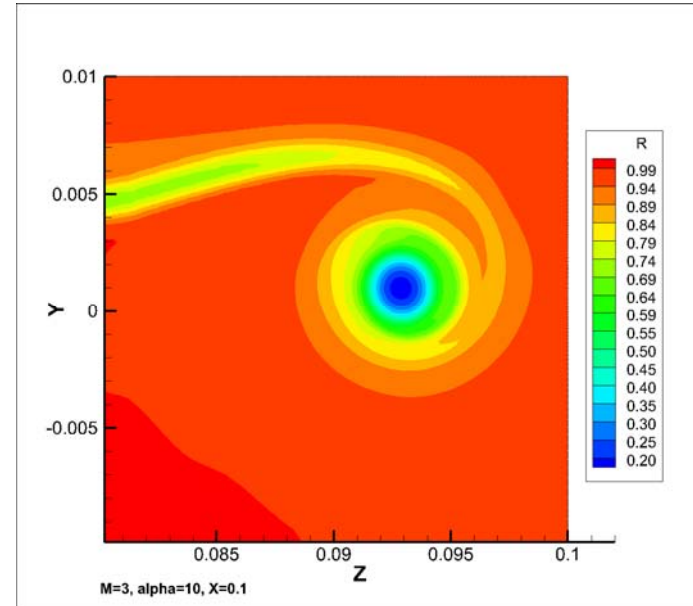
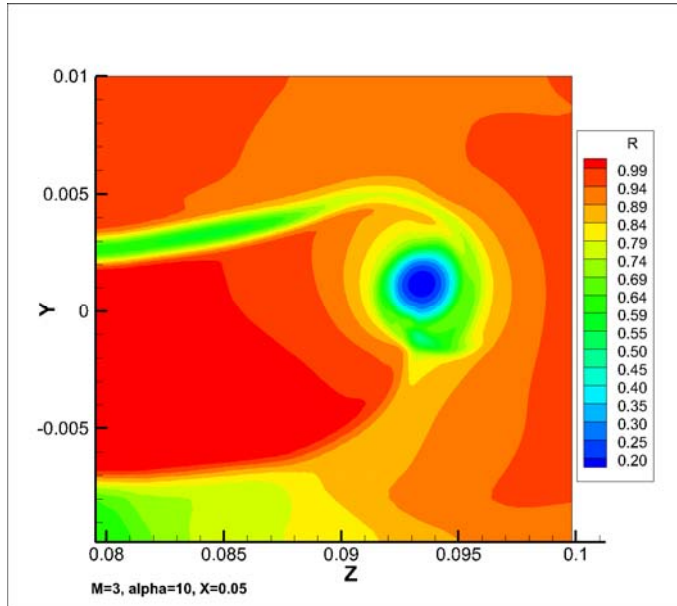
Структура течения



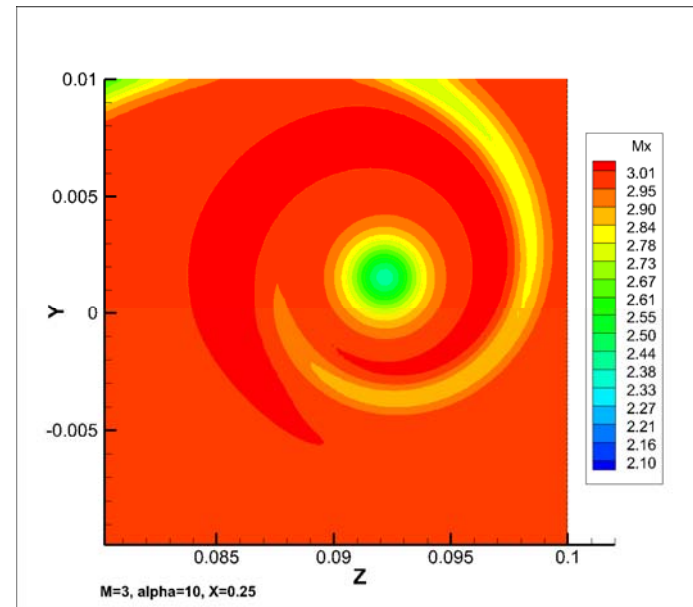
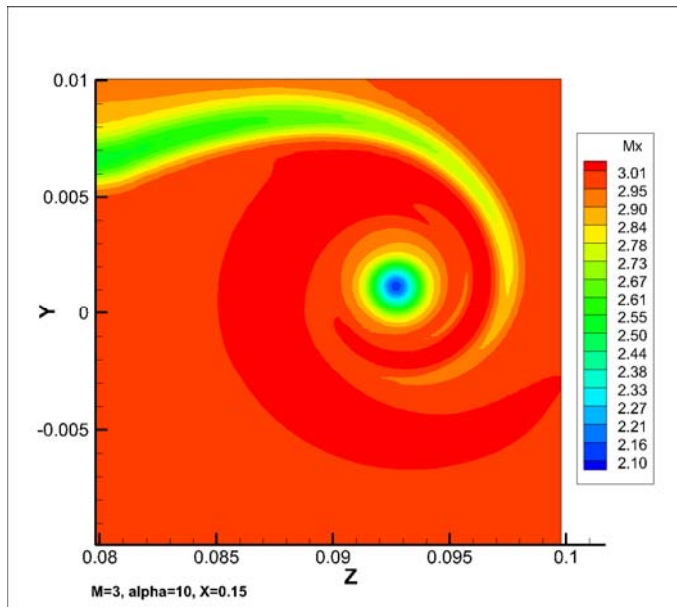
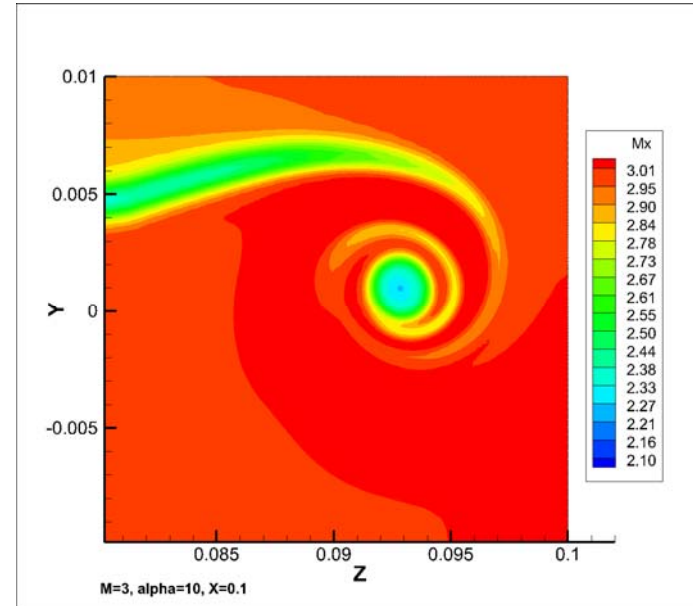
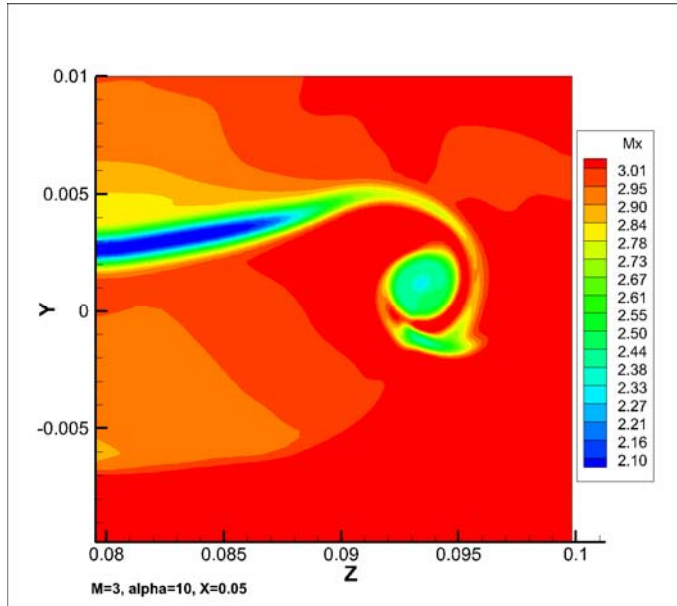
$M=3, \alpha=10^\circ$

Изоповерхности модуля ротора и изоповерхности давления

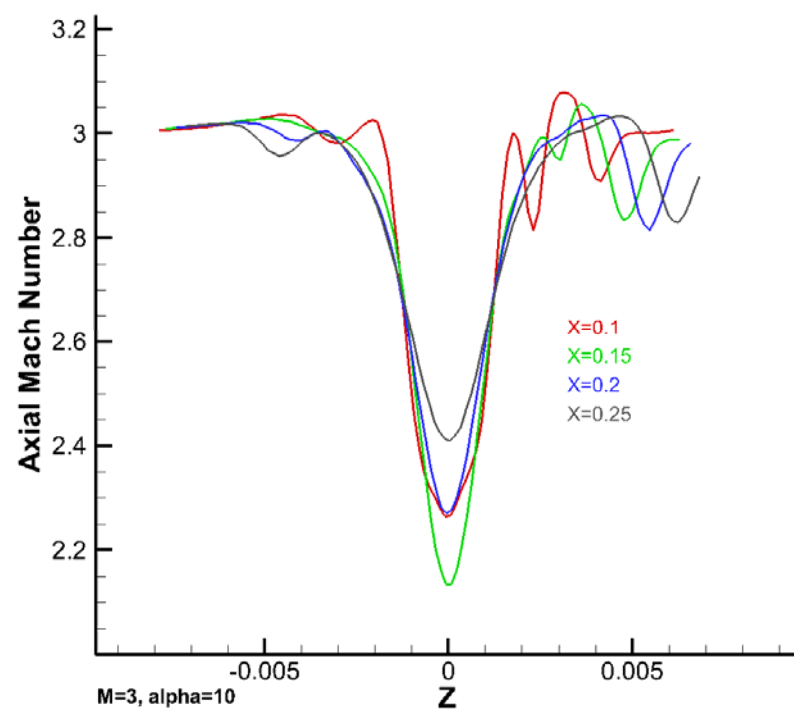
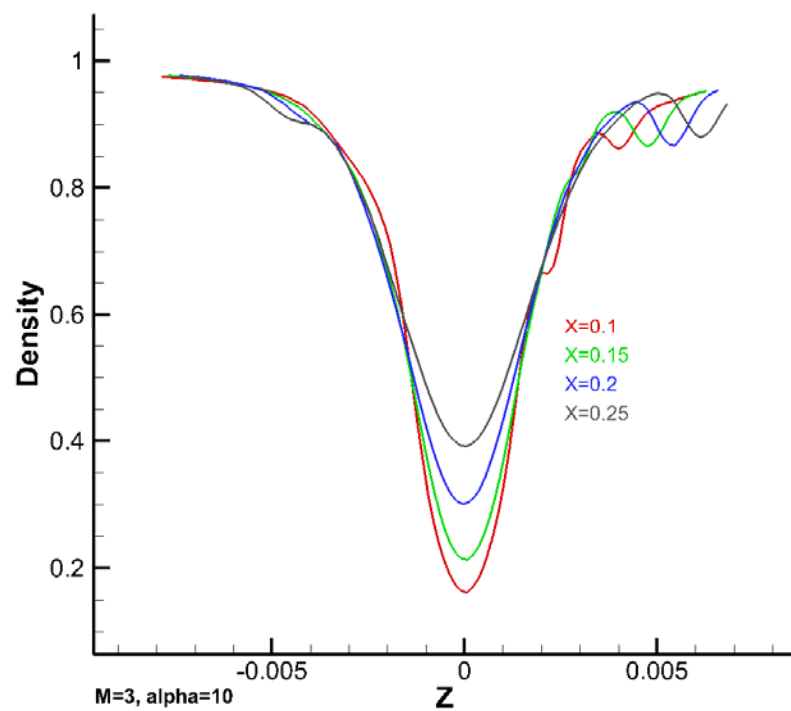
Распределение плотности в сечениях $X=\text{const}$



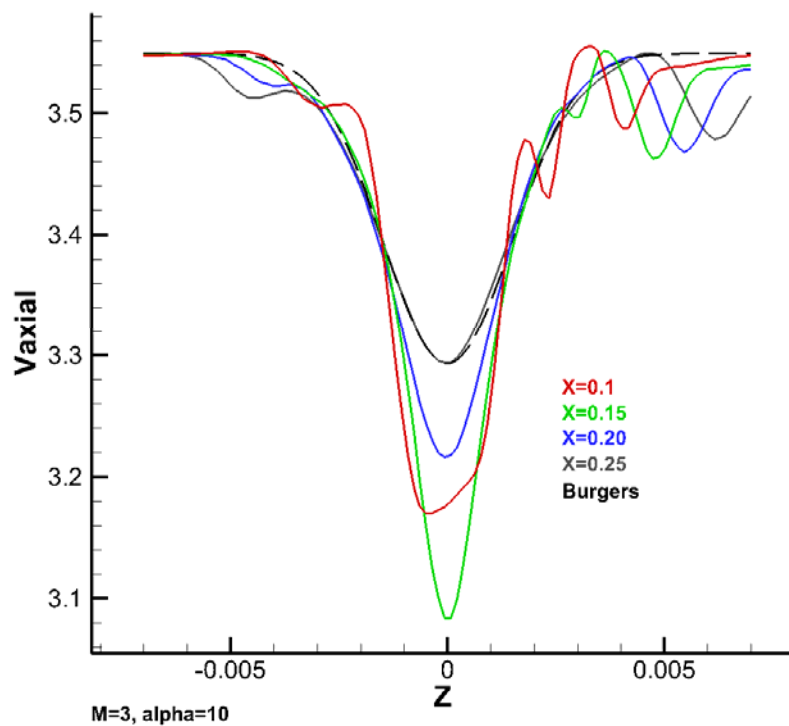
Распределение числа Маха в сечениях $X=\text{const}$



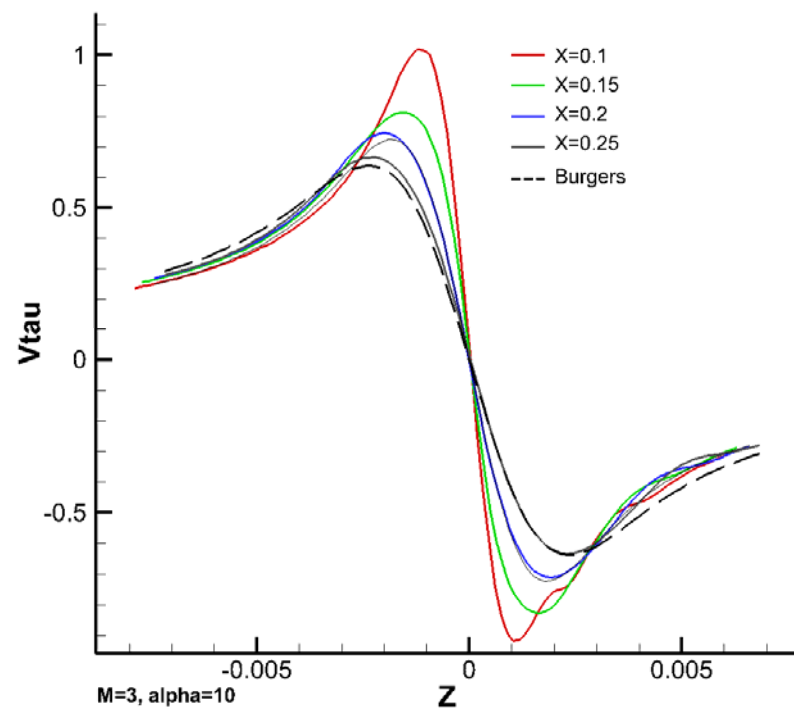
Эволюция концевой вихря



Сравнение с вихрем Бюргерса

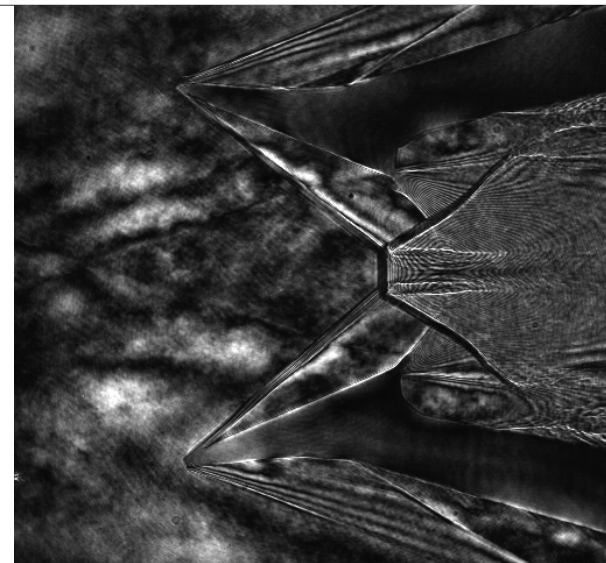
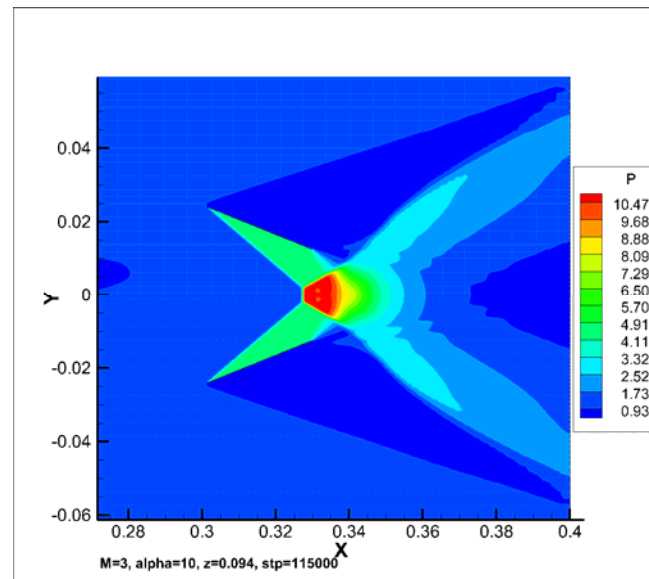
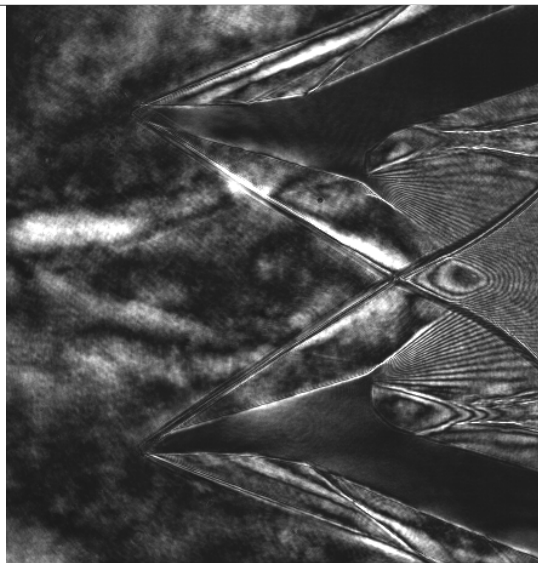
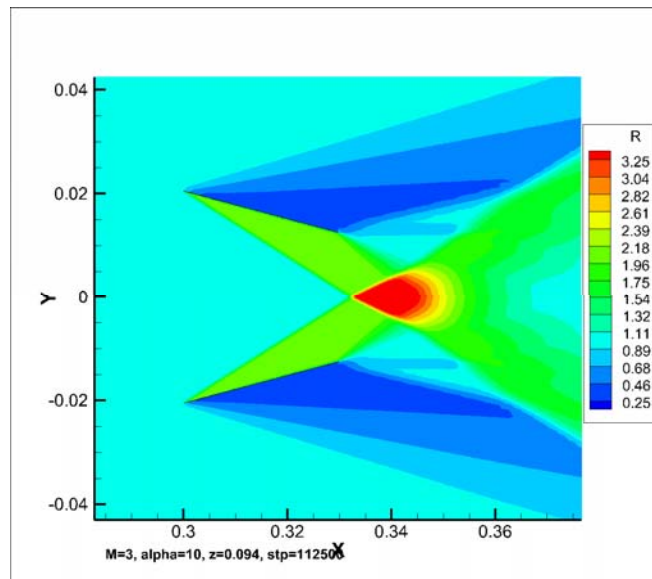


$$V_{\infty} + V_{\infty}(\Phi - 1) \left(e^{-(z/r_c)^2} \right)$$



$$\Gamma_0 \left(e^{-(z/r_c)^2} \right) / z$$

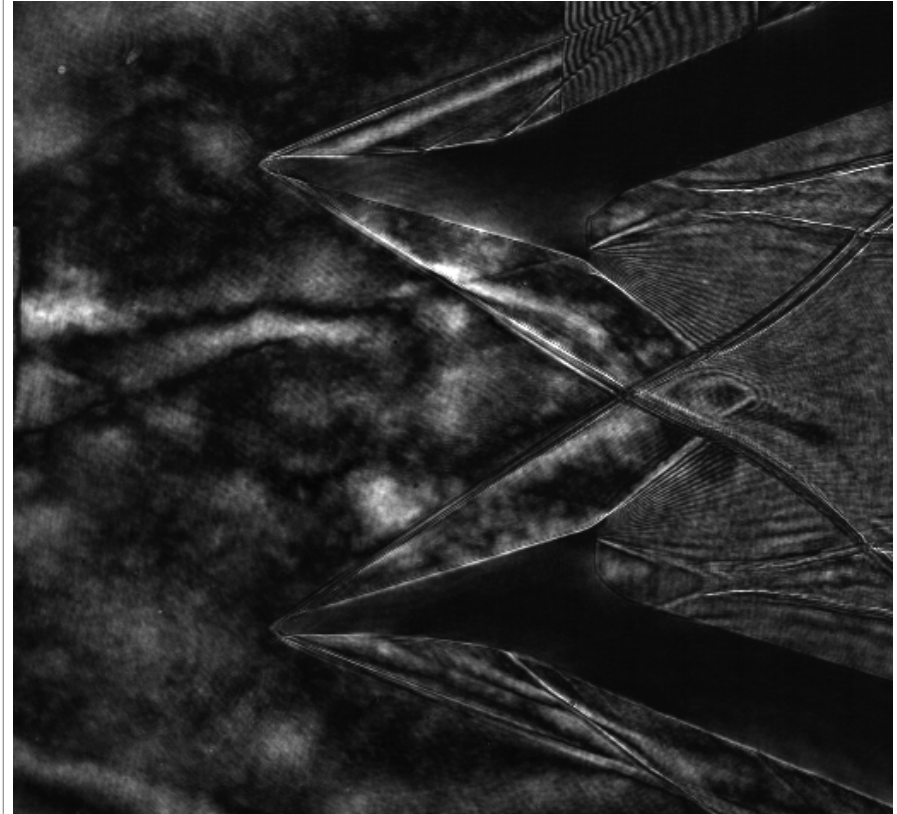
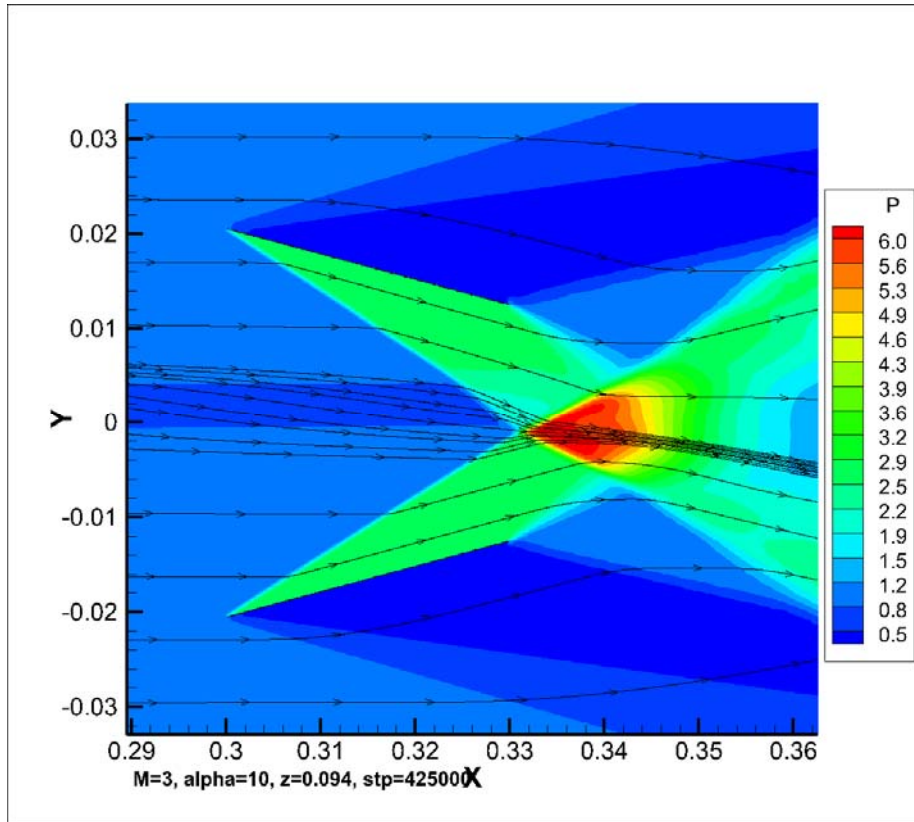
Регулярное и маховское взаимодействие ударных волн



M. S. Ivanov, G. N. Markelov, A. N. Kudryavtsev, and S. F. Gimelshein. Numerical Analysis of Shock Wave Reflection Transition in Steady Flows // AIAA Journal, Vol. 36 , No. 11 , November 1998.

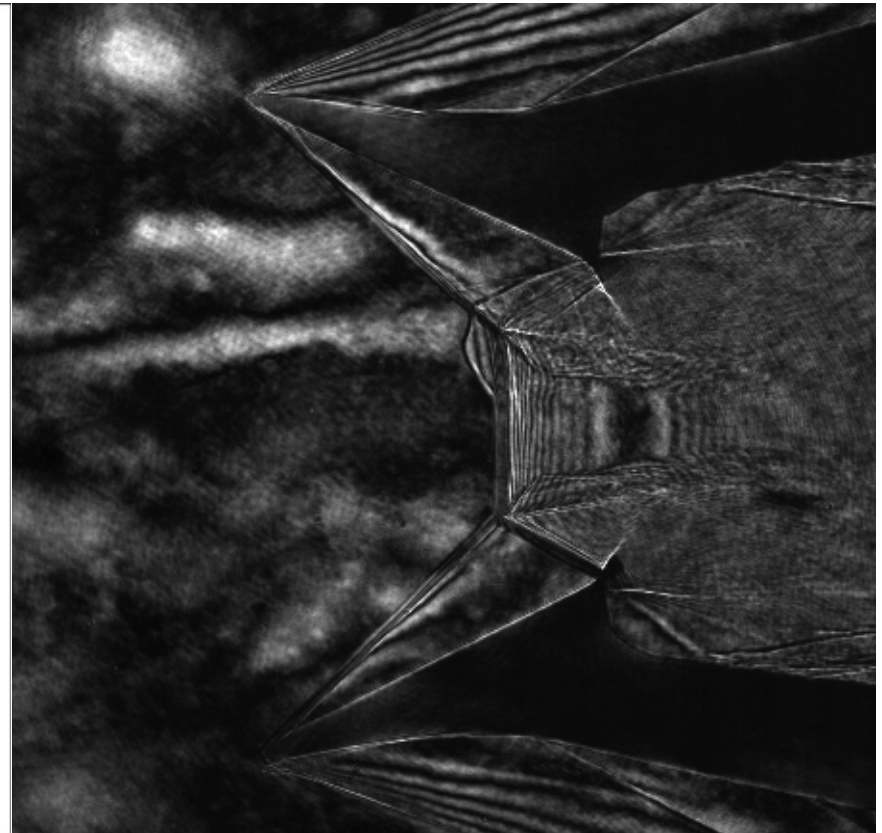
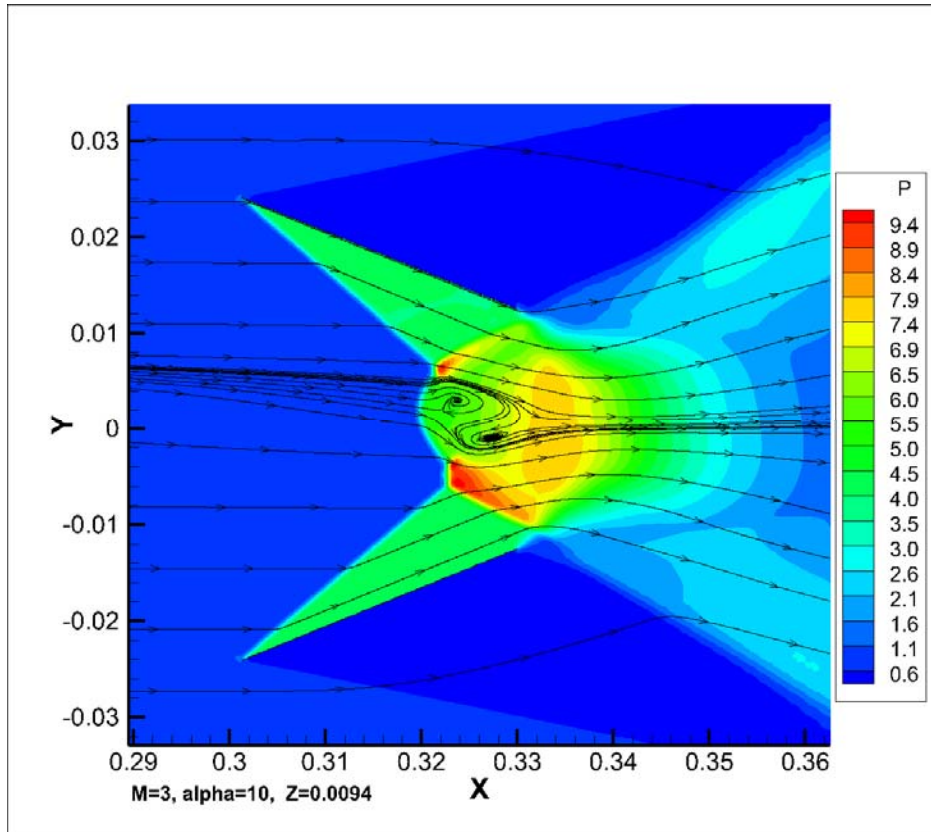
MS Ivanov , AN Kudryavtsev , SB Nikiforov , DV Khotyanovsky . Transition between regular and Mach -sky reflection of shock waves: new numerical and experimental results // Aeromechanics and gas-hand speaker , 2002, № 3 , pp. 3-12 .

Взаимодействие концевго вихря с системой пересекающихся косых скачков уплотнения

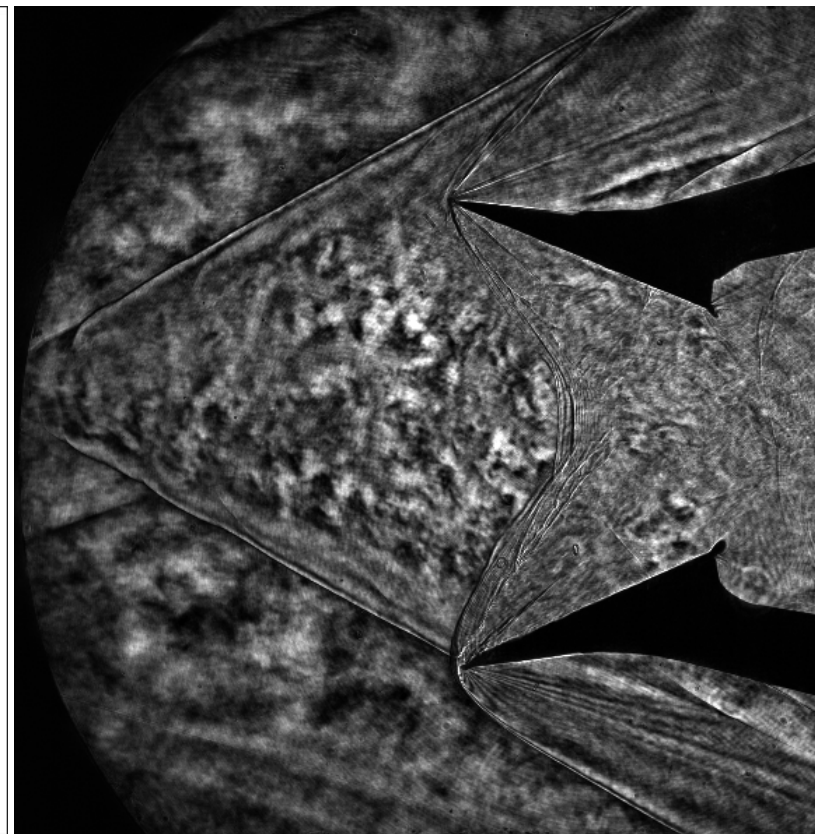
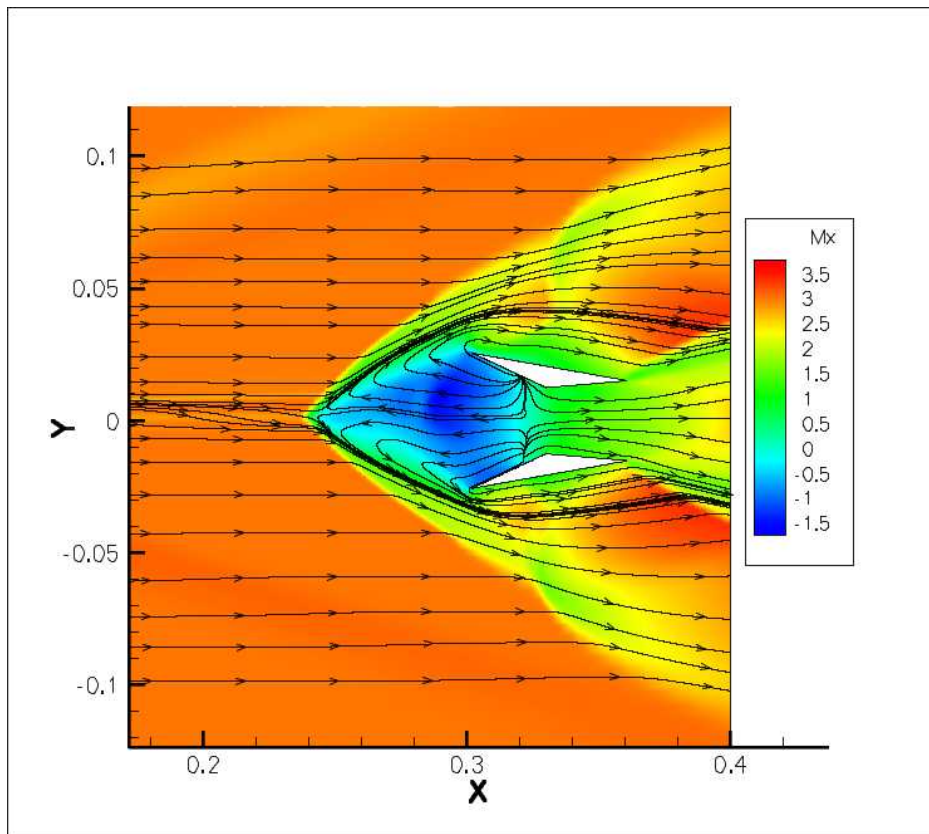


В. Н. Зудов, Е. А. Пимонов Взаимодействие продольного вихря с наклонной ударной волной
ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. 2003. Т. 44, N- 4

Взаимодействие концевых вихря с системой прямого и косого скачков уплотнения



Концевой вихрь + «выбитый» скачек уплотнения



Заключения

1. В рамках подхода RANS с моделью турбулентности Спаларта-Алмареса выполнено численное моделирование взаимодействия вихревого следа за крылом с системой ударных волн на гибридных вычислительных системах с графическими процессорами.

2. Получено качественное совпадение результатов численного и экспериментального исследований:

При реализации регулярного режима взаимодействие вихря с косым скачком происходит без видимого разрушения вихря;

При реализации Маховского режима происходит взаимодействие вихря с системой прямого и косого скачков. При этом наблюдается разрушение ядра вихря с образованием рециркуляционной зоны взаимодействия;