
Лекция 13.
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

Визуализация расчетных данных

- Построение изолиний и заливка цветом — вот графические техники, которые наиболее широко используются для представления вычислительных результатов. В то же время как более изощренные способы конструирования образов течения из расчетных полей газодинамических величин были развиты, вплоть до настоящего времени они не применяются в вычислительной аэродинамике так широко, как они того заслуживают.
- Численные интерферограммы, теневые картинки и шпирен-визуализации (Yates 1993, Quirk, 1994) позволяют построить картины течения, близко напоминающие те, что регистрируются экспериментально.
- Кроме того, они очень чувствительны к тонким деталям течения, также как к любому численному шуму. Последнее означает, что представляют суровое испытание качества численного моделирования. Более важным, однако, является то, что образы, полученные с помощью этих более новых способов визуализации, содержат ранее недоступную информацию об исследуемых течениях.

Численный шлирен

- Для двумерного течения, $\nabla \rho (x, y) = \left(\frac{\partial \rho}{\partial x}, \frac{\partial \rho}{\partial y} \right)^T$
- На экспериментальных шлирен-фотографиях либо $\partial \rho / \partial x$, либо $\partial \rho / \partial y$ визуализируется в зависимости от ориентации ножа.
- Для численных образов, наиболее подходящим выбором кажется абсолютная величина градиента плотности

$$|\nabla \rho| = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)^2}.$$

- Лучше всего использовать нелинейную шкалу, чтобы ясно представить даже слабые неоднородности течения, например изображая величину

$$S(x, y) = \beta \exp \left(-\frac{\kappa |\nabla \rho|}{|\nabla \rho|_{max}} \right).$$

Два свободных параметра $\beta \sim 0.8$, $\kappa \sim 15$.

Численные теневые картины

- Локальная интенсивность света на теневой картинке зависит от суммы вторых производных плотности:

$$\nabla^2 \rho = \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2}.$$

- Численная теневая картина может быть сконструирована, изображая эту величину в нелинейной шкале, как это делается для шлирен-визуализаций. Один из возможных выборов суть

$$D(x, y) = \beta \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\kappa \nabla^2 \rho}{|\nabla^2 \rho|_{max}} \right) \right].$$

В соответствии с моим опытом, константа κ должна быть много больше, чем для шлирен-визуализаций, $\kappa \sim 250$.

Численные интерферограммы

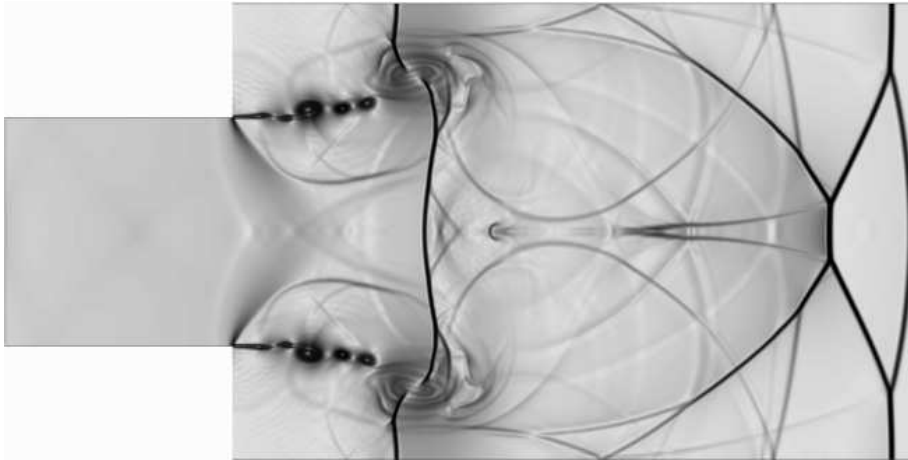
- Численные интерферограммы пытаются подражать экспериментальным картинам используя само поле плотности. Интенсивность света изменяется периодически с изменением плотности, воспроизводя экспериментальные интерферограммы, где это происходит из-за интерференции между пучком света, проходящим через течение и опорным пучком. Величина, которая на самом деле рисуется, суть

$$I(x, y) = 1 + \cos\left(2\pi\frac{\rho - \rho_0}{\Delta\rho}\right).$$

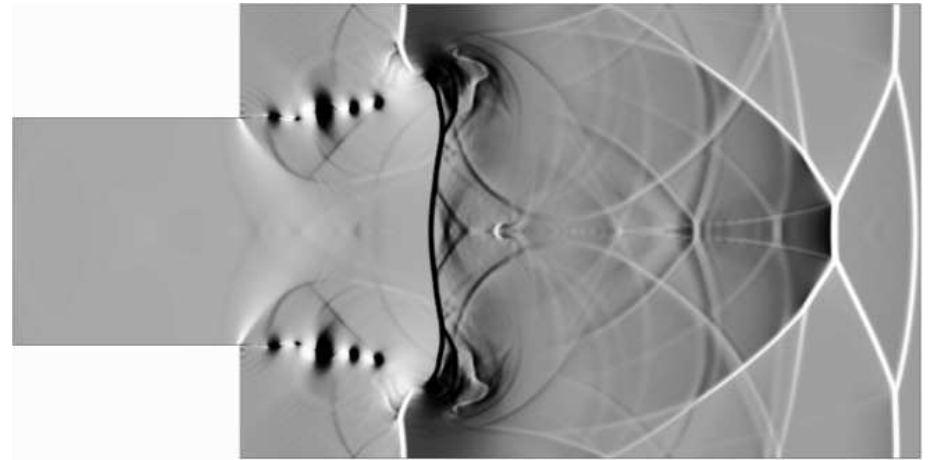
Характерное значение плотности ρ_0 изображается на интерферонграммах белым цветом. Различные выборы $\Delta\rho$ изменяют N , число интерференционных полос. Одна из возможностей — взять $\Delta\rho = (\rho_{max} - \rho_{min})/N$.

- Когда плотность меняется от ρ_{min} до ρ_{max} , оттенки серого цвета N раз проходят от белого до черного и назад, образуя картинку, которая высоко чувствительна к неоднородностям течения.

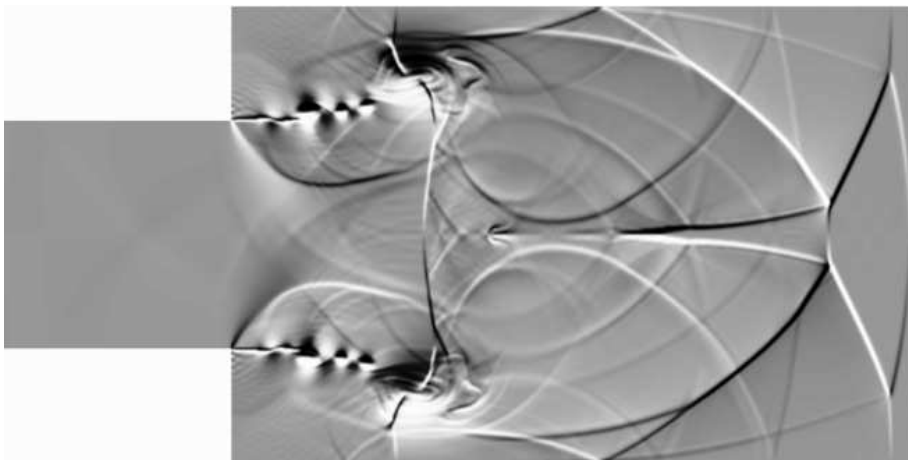
Сравнение различных способов визуализации



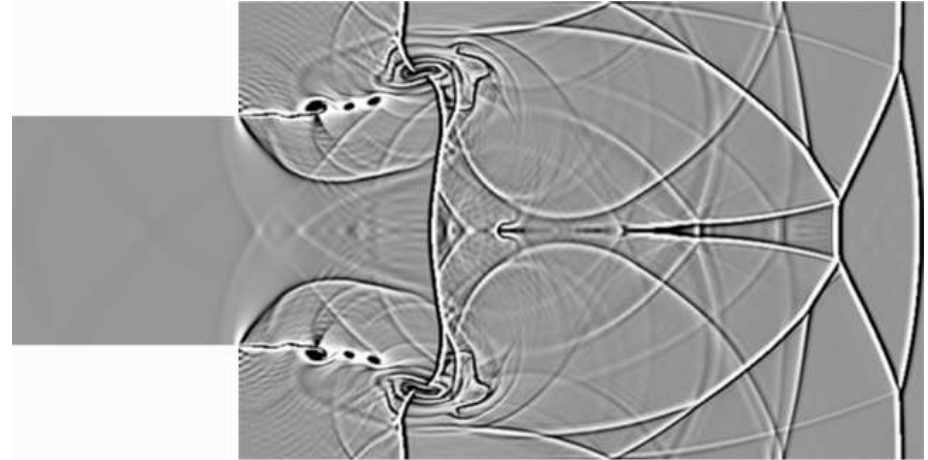
Шлирен-визуализация $|\nabla\rho|$



Шлирен-визуализация $\partial\rho/\partial x$



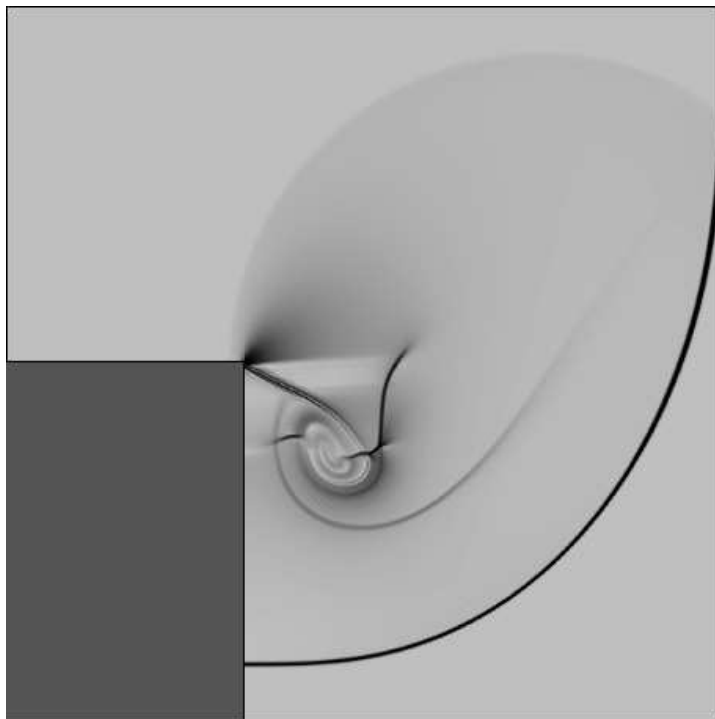
Шлирен-визуализация $\partial\rho/\partial y$



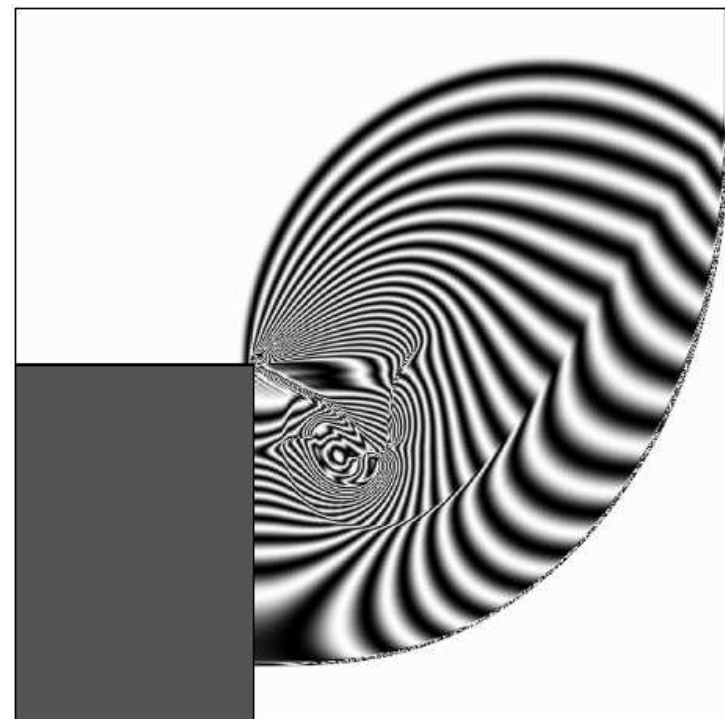
Теневая визуализация

Дифракция ударной волны ($M_s = 2$) на прямом угле

Численная шлирен-визуализация

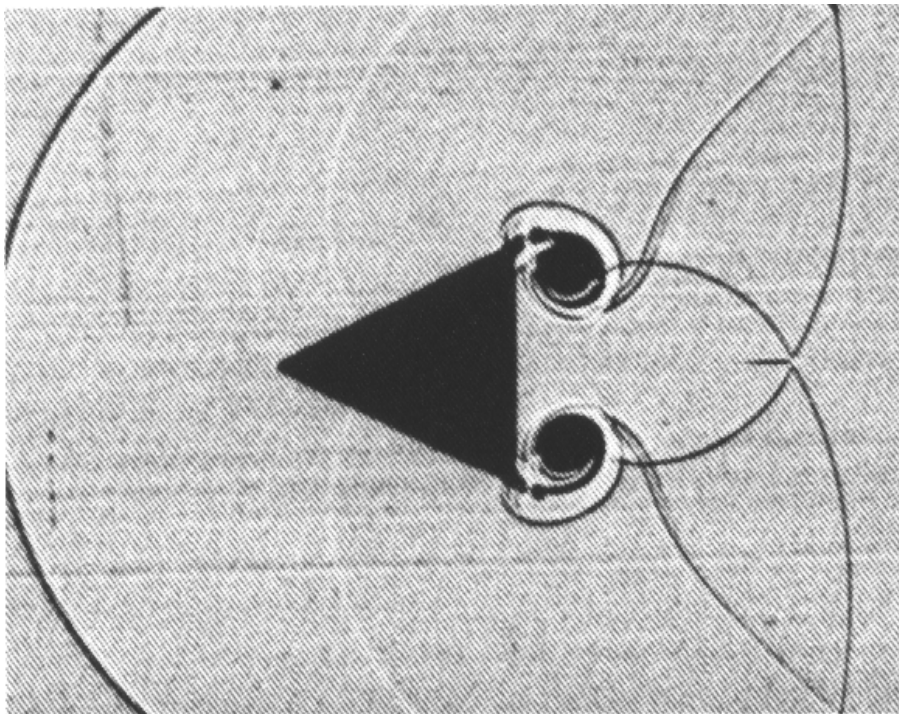


Численная интерферограмма



*Дифракция ударной волны ($M_s = 1,3$)
на треугольном теле*

Экспериментальная теньевая фотография



Численная шпирен-визуализация

