

## Численное моделирование гистерезиса волновых структур

Научный руководитель – Борисов Дмитрий Марианович

*Ключникова Александра Андреевна*

*Студент (магистр)*

Московский физико-технический институт, Москва, Россия

*E-mail: alexandra.klyuchnikova@phystech.edu*

Моделирование торможения сверхзвуковых потоков невозможно без корректного определения положения ударных волн и скачков уплотнения. При отражении косых скачков уплотнения возможно образование двух конфигураций течения, отражение Маха и регулярное отражение ударных волн, причём в зависимости от начальных условий возможно образование любой из них, т.е. наблюдается эффект гистерезиса [1,2,3,4].

В данной работе проведено численное моделирование взаимодействия косых скачков уплотнения и изучались образующиеся конфигурации течений. Острые клинья помещались в однородный сверхзвуковой поток газа, и при этом образовывался косой скачок уплотнения, прикрепленный к передней кромке клина. При взаимодействии этих косых скачков уплотнения в зависимости от параметров течения, конфигурации клиньев и начальных условий возникали два типа отражения ударных волн: регулярное отражение и отражение Маха.

Моделирование потока проводилось в предположении невязкого сжимаемого совершенного газа в двумерном приближении. Вязкие пристеночные эффекты не рассматривались. Такое течение описывается системой дифференциальных уравнений Эйлера, описывающих законы сохранения массы, импульса и энергии. Для моделирования течения невязкого сжимаемого газа использовался метод контрольных объёмов на неструктурированной расчётной сетке. Потоки через границы контрольного объёма рассчитывались с использованием решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва. Основным отличием используемой численной схемы является применение гибридного решателя задачи Римана, что позволило избежать образование нефизичных конфигураций течения, связанных со схемной вязкостью.

При обтекании двух симметрично установленных клиньев с углом клина  $\theta = 27^\circ$  сверхзвуковым потоком со скоростью потока, соответствующей  $M=4.5$ , получены стационарные решения, соответствующие регулярному и маховскому отражению, за счёт изменения начальных условий. Эти решения проиллюстрированы на рис. 1.

Также были смоделированы процессы перехода из одной конфигурации в другую, которые проиллюстрированы на рис. 2, 3.

Результаты моделирования с высокой точностью совпали с теоретическими исследованиями, а также с результатами моделирования других авторов.

### Источники и литература

- 1) von Neumann J. Oblique reflection of shocks. Explosives Research Report 12. Washington, DC, USA: Navy Dept Bureau of Ordinance, 1943.
- 2) von Neumann J. Refraction, intersection and reflection of shock waves. NAVORD Report, vol. 203–45. Washington, DC, USA: Navy Dept., Bureau of Ordinance, 1943.

- 3) Hornung H.G., Oertel Jr. H., Sandeman R.J. Transition to Mach reflection of shock waves in steady and pseudosteady flow with and without relaxation. J Fluid Mech 1979;90:541–60.
- 4) Ben-Dor G., Ivanov M., Vasilev E.I., Elperin T. Hysteresis processes in the regular reflection↔ Mach reflection transition in steady flows. Progress in Aerospace Science 38 (2002) 347 - 387.

### Иллюстрации

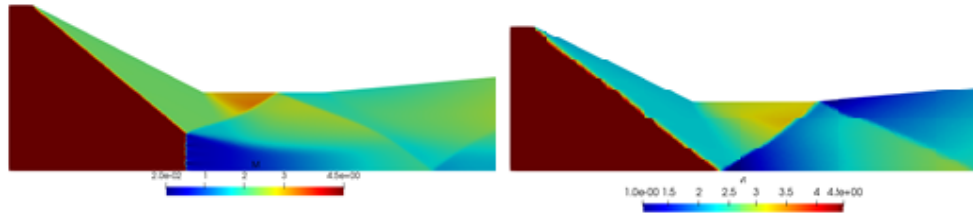


Рис. 1. Отражение Маха (слева) и регулярное отражение (справа) ударных волн.

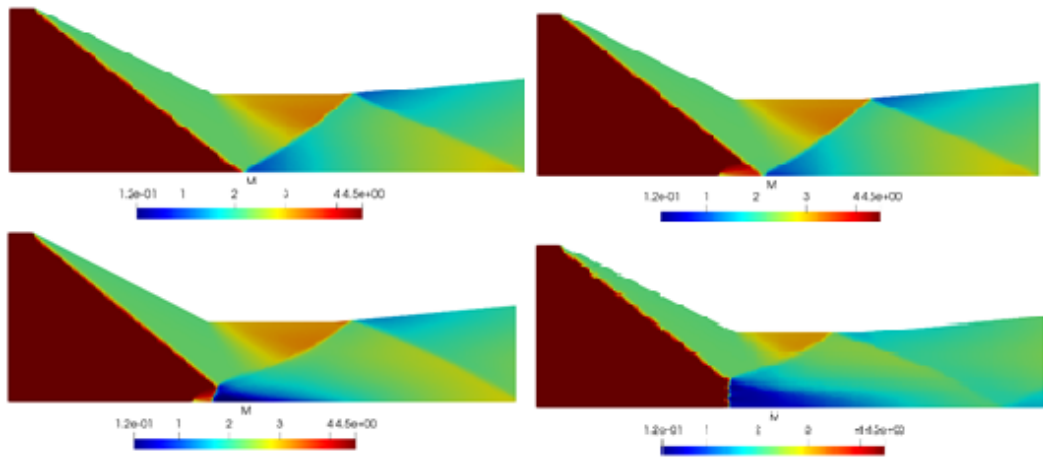


Рис. 2. Переход от регулярного отражения ударных волн к отражению Маха.

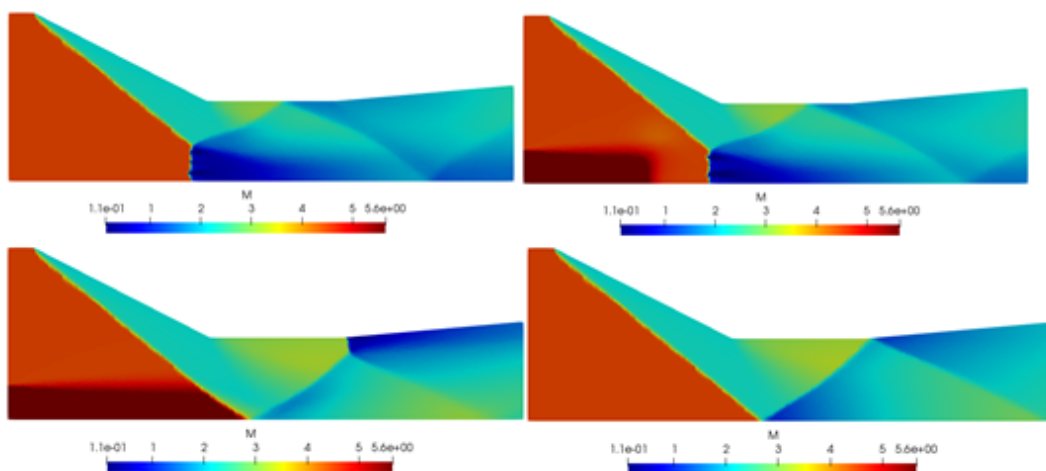


Рис. 3. Переход от отражения Маха ударных волн к регулярному отражению.