

Тема работы:

Вязкие эффекты при переходе от регулярного к маховскому отражению ударных волн

Состав коллектива:

Шоев Георгий Валерьевич, к.ф.-м.н., с.н.с. ИТПМ СО РАН

Научное содержание работы:**1. Постановка задачи.**

На основе численного решения уравнений Навье—Стокса изучается процесс смены типа отражения ударных волн в стационарном потоке аргона при увеличении угла падающего скачка. Рассмотрено слабое отражение ударных волн при числе Маха 2 и изменении угла поворота потока за падающим скачком от 10.7 до 12 градусов.

2. Современное состояние проблемы.

В невязком нетеплопроводном газе ударные волны (скачки) являются бесконечно тонкими разрывами, т. е. их пересечение является точкой без какого-либо конечного размера. При падении косога скачка на твердую поверхность (стенку) или плоскость симметрии возможны различные типы отражения в зависимости от числа Маха набегающего потока и угла падения скачка (или угла поворота потока за ним). В первом приближении, можно выделить два типа отражений: регулярное и нерегулярное (часто Маховское). В приближении невязкого газа хорошо известны два теоретических критерия перехода от регулярного к Маховскому отражению: критерий максимального угла поворота потока и критерий механического равновесия (также известен как критерий фон Неймана). С учетом явления гистерезиса и области двойного решения, если смена типа отражения происходит, то происходит мгновенно.

В вязком теплопроводном газе ударные волны имеют конечную ширину, следовательно, пересекаются не в точке, а в некоторой области конечного размера. Хорошо известно, что за этой областью параметры могут отличаться от параметров, предсказываемых невязкой теорией, следовательно, могут влиять на процесс перехода от регулярного к Маховскому отражению. Цель настоящего численного моделирования, проведенного на суперкомпьютере НГУ, являлось исследовать это влияние.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Численное моделирование отражения ударных волн проводилось на основе уравнений Навье—Стокса с использованием авторского программного комплекса HyCFS (Hybrid Compressible Flow Solver), разработанного в ИТПМ СО РАН.

Уравнения Навье—Стокса решаются на структурированной четырехугольной сетке методом установления с использованием схемы WENO (Weighted Essentially Non-Oscillatory) 5-го порядка для конвективных членов, центрально-разностной схемой 2-го порядка для диффузионных членов и интегрирования по времени с использованием схемы Рунге-Кутты 2-го порядка. Расчеты проводились при числе Рейнольдса 1000.

На Рис. 1 показана типичная расчетная область и результат моделирования.

4. Полученные результаты.

На Рис. 1 показан изолинии числа Маха для угла поворота потока за падающим скачком 10.7, когда согласно теоретическому критерию должно реализовываться регулярное отражение. Как видно из рисунка численное моделирование также предсказывает двухскачковую конфигурацию. При дальнейшем увеличении поворота потока за падающим скачком до 10.9 согласно теоретическому критерию в невязком потоке должен произойти переход к Маховскому отражению. В вязком потоке, как видно из Рис. 2b, этого не происходит. Вместо маховского

отражения наблюдается двухскачковая конфигурация, аналогичная регулярному отражению. При дальнейшем увеличении угла поворота потока за падающим скачком сначала формируются слои смешения Рис. 2b с «высотой» ножки Маха соизмеримой с ее толщиной. Далее при увеличении угла поворота потока за падающим скачком до 12 градусов возникает Маховское отражение. Таким образом, показана задержка перехода от регулярному к Маховскому отражению ударных волн. Во время процесса смены типа отражений возникает область параметров, когда в вязком потоке формируется двухскачковая конфигурация невозможная в приближении невязкого нетеплопроводного газа.

5. Иллюстрации, визуализация результатов.

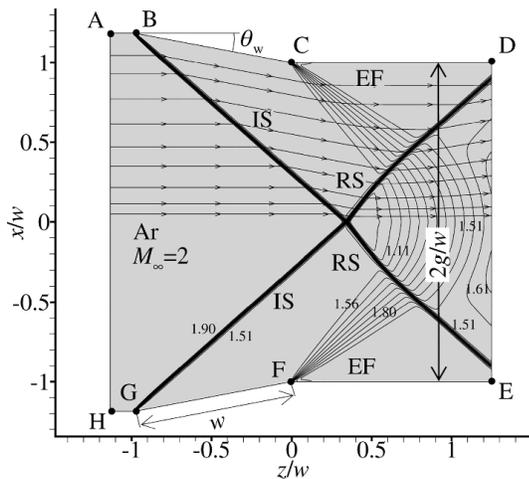


Рис. 1. Пример расчетной области и изолинии числа Маха. AH — входная граница с заданными параметрами набегающего потока, ABCD и HGFE — невязкая стенка (условие непротекания), DE — сверхзвуковой выход. IS — падающий скачок, RS — отраженный скачок, EF — «центрированная волна разрежения» (ее аналог в вязком потоке).

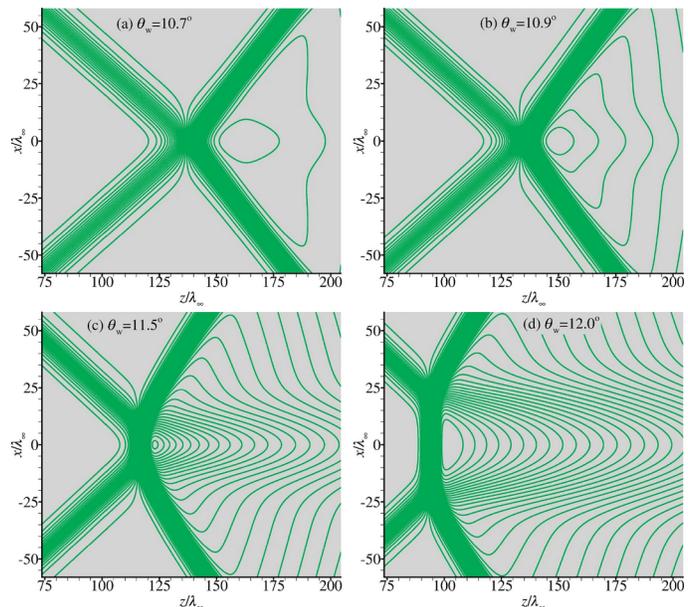


Рис. 2. Компоненты скорости вдоль оси z в области отражения на плоскости симметрии при различных углах поворота потока за падающим скачком.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы значительный, поскольку большое количество расчетов, требуемое для данной работы, невозможно на персональных компьютерах.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы.

Shoey, G., Nazarov, V. & Timokhin, M. Numerical study of viscous effects on the formation of the Mach reflection in a transition from regular reflection. Shock Waves 35, 109–124 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00193-024-01213-1>