

УДК 533.6.011.72

Особенности высокоскоростного течения с импульсным энерговыделением на прямом скачке уплотнения

Чернышов Михаил Викторович

mvcher@mail.ru

SPIN-код: 2591-9843

Лаптинская Мария Михайловна

amara96@mail.ru

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлен аналог критерия фон Неймана, позволяющий определить смену типа отражения косого скачка уплотнения в условиях импульсного энерговыделения и изменения химического состава смеси газов на главном (маховском) скачке. Проведена оценка смещения критерия фон Неймана по сравнению с классическим случаем отражения, проанализированы аналитические соотношения.

Ключевые слова: регулярное отражение, маховское отражение, критерий фон Неймана, энерговыделение, скачок уплотнения

Введение. Взаимодействие скачков уплотнения в возникающих ударно-волновых структурах определяет устойчивость полета высокоскоростного летательного аппарата, эффективность работы его двигательной установки и ряд других факторов. Существует большое количество работ по взаимодействию симметричных скачков уплотнения, их отражению от твердой поверхности, оси или плоскости симметрии течения. Однако в реальных технических установках значительно чаще встречаются конфигурации асимметричного отражения (взаимодействия встречных скачков разной интенсивности), математическая модель более сложна [1–3]. Особый интерес представляет нерегулярное взаимодействие встречных скачков уплотнения с образованием главного (маховского) скачка, или диска Маха (несимметричное маховское отражение). При таком отражении встречные падающие, отраженные и искривленный главный (маховский) скачки образуют две тройные конфигурации с тройными точками. Для эффективного разделения и правильной оценки интегральных параметров потоков за отраженными и маховским скачками необходимо установить (численно или с применением аналитических моделей) высоту и форму маховского скачка, форму тангенциальных разрывов, исходящих из тройных точек, а также условия перехода от маховского отражения к регулярному. В работе рассматривается известный критерий фон Неймана смены типа отражения, который аналитически обобщен для течений с импульсным энерговыделением на главном скачке.

Методы и материалы; результаты. К настоящему моменту широко известны основные критерии перехода от регулярного отражения к маховскому [4–7]. При умеренных и больших числах Маха установившегося течения чаще всего применяется критерий смены типа отражения косых скачков, введенный фон Нейманом [4]. Согласно критерию фон Неймана, переход от маховского отражения к регулярному соответствует образованию стационарной маховской конфигурации (СМК) с прямым главным скачком. Параметры

скачков уплотнения, составляющих СМК, связаны условиями совместности на исходящем тангенциальном разрыве. Образование СМК, соответствующее критерию фон Неймана, принимается в качестве основного признака смены вида отражения косых скачков в сверхзвуковых стационарных течениях.

В данной работе учитывается возможность импульсного энерговыделения и изменения химического состава газовой смеси, инициированного большим ростом температуры на главном скачке. Параметры течения на сторонах главного скачка связывались при помощи модели стационарной детонации Чепмена — Жуге. Более сложные и современные модели детонации, несомненно, уточнят полученные результаты, но вряд ли способны привести к конечным соотношениям, качественно описывающим полученный обобщенный критерий фон Неймана в легко доступной для анализа форме.

В результате работы показано, что при положительном энерговыделении критерий фон Неймана смещается в сторону более слабых, а при отрицательном — в сторону более сильных падающих скачков уплотнения. Уменьшение показателя адиабаты на главном скачке обычно ведет к увеличению «фон-Неймановских» значений интенсивности падающего скачка, а рост значения показателя адиабаты, как правило, к их уменьшению. Угол наклона падающего скачка во втором случае уменьшается.

Заключение. Получены соотношения, определяющие условия существования несимметричного маховского отражения при условии импульсного энерговыделения на главном скачке. Определено смещение условий перехода от маховского отражения к регулярному по сравнению с течением не реагирующего газа и изменение структуры течения в целом.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки
и высшего образования Российской Федерации
(проект № FZWF-2024-0003).*

Список источников

- [1] Tao Y., Liu W., Fan X., Xiong B., Yu J., Sun M. A study of the asymmetric shock reflection configurations in steady flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, vol. 825, pp. 1–15.
- [2] Roy Sh., Gopalapillai R. An analytical model for asymmetric Mach reflection configuration in steady flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, vol. 863, pp. 242–268.
- [3] Lin J., Bai Ch.-Y., Wu Z.-N. Study of asymmetrical shock wave reflection in steady supersonic flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, vol. 864, pp. 848–875.
- [4] Von Neumann J. Oblique reflection of shock waves. *Collected Works*. London, Pergamon Press, 1963, vol. 6, pp. 238–299.
- [5] Адрианов А.Л., Старых А.Л., Усков В.Н. *Интерференция стационарных газодинамических разрывов*. Новосибирск, Наука, 1995, 180 с.
- [6] Laptinskaya M.M., Savelova K.E., Chernyshov M.V. Problems of Existence and Ambiguity of Solution at Asymmetrical Reflection of Steady Shocks. *Russian Aeronautics*, 2024, vol. 67 (4), pp. 811–820.
- [7] Ben-Dor G. *Shock Wave Reflection Phenomena*. Berlin, Heidelberg, 2007, 342 p.