

Оптимальные ударно-волновые системы и структуры с энергоподводом: теория и приложения

М.В. Чернышов, К.Э. Савелова

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
<https://www.voenmeh.ru/education/faculties-and-departments/faca/kaf-a9>

Анализ течений с нерегулярным (маховским) отражением скачков уплотнения важен при газодинамическом конструировании сверхзвуковых воздухозаборников, сопел, аппаратов струйных технологий. Согласно [1-3], разнообразные параметры течения (давления торможения, скорости, скоростные напоры и т.д.) в потоках, разделенных тангенциальным разрывом за тройной точкой маховского отражения, значительно различаются, что способно определять проектный облик газодинамических устройств. К примеру, в [4, 5] предложена и теоретически обоснована идея нового комбинированного прямоточного реактивного двигателя. Согласно этой концепции, поток газа за отраженным скачком, обладающий существенно бóльшим давлением торможения, чем поток за главным (маховским) скачком, используется в термодинамическом цикле классического прямоточного воздушно-реактивного двигателя. Поток за главным скачком, обладающий значительно более высокой температурой, особенно при полете с большими сверхзвуковыми скоростями, может быть использован в термодинамическом цикле детонационного двигателя. Для успешного разделения двух потоков за тройной точкой маховского отражения определить необходимо высоту тройной точки и форму исходящего из неё тангенциального разрыва, а для оценки интегральных характеристик перспективного комбинированного двигателя – форму и размеры всех других газодинамических разрывов в поле течения.

В данной работе представлена приближенно-аналитическая модель для быстрого расчёта параметров ударно-волновой структуры течения реакционноспособной газовой смеси с маховским отражением, а также некоторые результаты её применения. Предлагаемая модель основана на ранее апробированной [6, 7] приближенно-аналитической модели сверхзвуковых течений с маховским отражением в струях, соплах, каналах воздухозаборников, которая, в свою очередь, базируется на ранее полученных частных решениях задач о существовании и неоднозначности решения для ударно-волновых структур различного типа [8, 9], сопряжении области квазиодномерного течения с волной разрежения [10, 11], взаимодействии косых скачков уплотнения с волнами Прандтля-Майера [12], развороте тангенциального разрыва под влиянием падающей волны разрежения [9]. Новая модель [13-15] впервые учитывает изменение химического состава газовой смеси и импульсный энергоподвод на главном скачке.

Первичные результаты, полученные при расчете сверхзвукового струйного течения метановоздушной, водородовоздушной, водород-кислородной газовой смеси, показывают не только более раннее возникновение маховского отражения по сравнению с аналогичным течением без химических реакций, но и значительное увеличение геометрических размеров главного скачка уплотнения, что должно учитываться в практике газодинамического конструирования перспективных двигательных устройств высокоскоростных летательных аппаратов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Создание и научное обоснование методологии аэрогазодинамического проектирования общего облика двигательных и энергетических установок, технологий разработки и массового производства беспилотной аэрокосмической техники для решения задач в экстремальных условиях и чрезвычайных ситуациях», № FZWF-2024-0003).

Литература

1. Усков В.Н., Чернышов М.В. Особые и экстремальные тройные конфигурации скачков уплотнения // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 4. С. 39-53. Англ. перевод: Uskov V.N., Chernyshov M.V. Special and extreme triple shock-wave configurations // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2006. Vol. 47. No. 4. Pp. 492-504.

2. Чернышов М.В. Экстремальные тройные конфигурации с отрицательным углом наклона отраженного скачка // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2019. № 2. С. 82-88.

Англ. перевод: Chernyshov M.V. Extreme Triple Configurations with Negative Slope Angle of the Reflected Shock // Russian Aeronautics. 2019. Vol. 62. No. 2. Pp. 259-266.

3. Чернышов М.В., Гвоздева Л.Г. Тройные конфигурации скачков уплотнения и бегущих ударных волн // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 2. С. 87-110.

Англ. перевод: Chernyshov M.V., Gvozdeva L.G. Triple Configurations of Steady and Propagating Shocks // Russian Aeronautics. 2022. Vol. 65. No. 2. Pp. 319-344.

4. Chernyshov M.V., Murzina K.E., Matveev S.A., Yakovlev V.V. Shock-wave structures of prospective combined ramjet engine // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 618. Paper No. 012068. 10 pp.

5. Savelova K.E., Alekseeva M.M., Matveev S.A., Chernyshov M.V. Shock-wave structure of prospective combined jet engine // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1959. Paper No. 012043. 9 p.

6. Омельченко А.В., Усков В.Н., Чернышов М.В. Об одной приближенной аналитической модели течения в первой бочке перерасширенной струи // Письма в Журнал технической физики. 2003. Т. 29. Вып. 6. С. 56-62.

Англ. перевод: Omel'chenko A.V., Uskov V.N., Chernyshev M.V. An Approximate Analytical Model of Flow in the First Barrel of an Overexpanded Jet // Technical Physics Letters. 2003. Vol. 29. No. 3. Pp. 243-245.

7. Chernyshov M.V., Savelova K.E., Kapralova A.S. Approximate Analytical Models of Shock-Wave Structure at Steady Mach Reflection // Fluids. 2021. Vol. 6. Issue 9. Paper No. 305. 18 p.

8. Сильников М.В., Чернышов М.В., Гвоздева Л.Г. Аналитическое описание области существования тройных конфигураций с отрицательным углом наклона отраженного скачка // Журнал технической физики. 2016. Том 86. Вып. 11. С. 30-34.

Англ. перевод: Sil'nikov M.V., Chernyshov M.V., Gvozdeva L.G. Analytic Description of the Domain of Existence of Triple Configurations with a Negative Slope of Reflected Shock // Technical Physics. 2016. Vol. 61. No. 11. Pp. 1633-1637.

9. Chernyshov M.V., Kapralova A.S., Savelova K.E. Ambiguity of solution for triple configurations of stationary shocks with negative reflection angle // Acta Astronautica. 2021. Vol. 179. Pp. 382-390.

10. Усков В.Н., Чернышов М.В. Сопряжение волны Прандтля-Майера с областью квазиодномерного течения // Математическое моделирование. 2003. Т. 15. № 6. С. 111-119.

11. Silnikov M.V., Chernyshov M.V. The interaction of Prandtl-Meyer wave and quasi-one-dimensional flow region // Acta Astronautica. 2015. Vol. 109. Pp. 248-253.

12. Silnikov M.V., Chernyshov M.V., Uskov V.N. Analytical solutions for Prandtl-Meyer wave – oblique shock overtaking interaction // Acta Astronautica. 2014. Vol. 99. Pp. 175-183.

13. Chernyshov M.V., Savelova K.E. An Approximate Analytical Model of a Jet Flow with Mach Reflection and Pulsed Energy Supply at the Main Shock // Fluids. 2023. Vol. 8. Issue 4. Paper No. 132. 16 p.

14. Chernyshov M.V., Kapralova A.S., Matveev S.A., Savelova K.E. Stationary Mach Configurations with Pulsed Energy Release on the Normal Shock // Fluids. 2021. Vol. 6. Issue 12. Paper No. 439. 16 p.

15. Чернышов М.В., Савелова К.Э. Приближенно-аналитическая модель струйного течения с маховским отражением и импульсным энергоподводом на главном скачке // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2023. № 1. С. 49-60.

Англ. версия: Chernyshov M.V., Savelova K.E. Approximate Analytical Model of Jet Flow with Mach Reflection and Pulsed Energy Supply at the Main Shock // Russian Aeronautics. 2023. Vol. 66. No. 1. Pp. 51-63.