

Численное моделирование неравновесных процессов за ударной волной в смеси CO_2 и Ar

Баталов С.А.¹ и Кустова Е.В.²

Численное моделирование сильнонеравновесных процессов в смесях реагирующих газов является актуальным направлением в современной гидрогазодинамике. В частности, большой научный интерес представляют процессы, происходящие за фронтом ударной волны. В настоящее время активно используются как теоретические, так и экспериментальные методы анализа подобных процессов.

В зависимости от степени отклонения от равновесия для описания течения могут применяться детальные поуровневые и сокращенные многотемпературные модели [1]. Наибольший практический интерес представляет многотемпературная модель неравновесных течений, так как она является наиболее эффективной с вычислительной точки зрения. В недавних работах [2-4] представлены результаты и методы моделирования неравновесного течения однокомпонентного вязкого углекислого газа. Так, в исследовании [2] строится и реализуется многотемпературная модель процессов релаксации в CO_2 за ударной волной в одномерной постановке с учетом сдвиговой и объемной вязкости, теплопроводности поступательных, вращательных и колебательных степеней свободы, а также релаксации колебательной энергии в различных модах молекулы углекислого газа.

Мы будем базироваться на результатах работы [2] и усложним модель добавлением еще одной компоненты – аргона. В данном случае выбран этот газ, так как для смеси CO_2 – Ar существуют результаты, полученные экспериментально [5], которые позволят провести валидацию модели. Таким образом, основной задачей текущей работы является моделирование сильнонеравновесного течения смеси CO_2 – Ar за ударной волной в одномерном случае.

Для решения поставленной задачи использована многотемпературная модель для смеси газов с учетом внутренних колебательных степеней свободы молекулы CO_2 . В модели уравнения сохранения массы, импульса и энергии дополняются уравнениями релаксации для колебательной энергии объединенной (симметричной-деформационной) и антисимметричной мод молекулы CO_2 и уравнениями диффузии

1 Студент кафедры гидроаэромеханики, СПбГУ, st076569@student.spbu.ru

2 Профессор кафедры гидроаэромеханики, СПбГУ, e.kustova@spbu.ru

для компонентов смеси. Важную часть модели составляют алгоритмы вычисления коэффициентов переноса: вязкости, теплопроводности, диффузии, построенные строгими методами кинетической теории газов [1, 6]. Численное решение системы гидродинамических уравнений производится с помощью метода конечных объемов, а именно метода Годунова. Применение данного подхода обосновано в работе [3].

Авторы надеются получить хорошее согласование с экспериментом, так как опыт предыдущих работ показал, что многотемпературная модель в достаточной степени точности описывает процессы в реальных неравновесных системах. Однако также ожидаются сложности при расчете коэффициентов переноса, это потребует дополнительной оптимизации моделирующих алгоритмов.

Исследование выполнено при поддержке СПбГУ (проект № 93022273).

Список литературы

- [1] Е.А. Нагнибеда, Е.В. Кустова, «Кинетическая теория процессов переноса и релаксации в потоках неравновесных реагирующих газов». – СПб.: Издательство С. Петербургского университета, 2003. – 272 с., ISBN 5-288-03357-9.
- [2] I. Alekseev, E. Kustova, Extended continuum models for shock waves in CO₂ // Phys. Fluids 33, 096101 (2021).
- [3] Алексеев И. В., Кустова Е. В. Численное моделирование ударной волны в вязком углекислом газе методом конечных объемов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2020. Т. 7 (65). Вып. 3. С. 500–510.
- [4] E.V. Kustova, E.A. Nagnibeda, On a correct description of a multi-temperature dissociating CO₂ flow // Chem. Phys. 321, 293–310 (2006).
- [5] A. Farooq, J. B. Jeffries, and R. K. Hanson, Sensitive detection of temperature behind reflected shock waves using wavelength modulation spectroscopy of CO₂ near 2.7 μm // Appl. Phys. B 96, 161–173 (2009).
- [6] Кустова Е.В., Мехоношина М.А, «Некоторые математические преобразования в кинетической теории газов». – СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2017.