

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТНОЙ И ТЕПЛОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ ЧАСТИЦ ЗА УДАРНЫМИ И ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ

И.А. Бедарев ¹, К.В. Рылова ¹, А.В. Федоров ^{1,2,3}

¹ *Институт теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1*

² *Новосибирский государственный технический университет,
630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20*

³ *Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

Работа связана с задачей физико-математического описания явлений в реагирующих гетерогенных средах и посвящена разработке методов изучения ударно-волновых, взрывных и детонационных явлений в смеси газов и реагирующих частиц. Построение математических моделей механики реагирующих/инертных гетерогенных сред требует точного представления о локальных характеристиках поля течения, возникающего при взаимодействии газовой фазы и мелких частиц дискретной фазы. При прохождении ударной или детонационной волны через облако частиц такие характеристики обтекания как сопротивление частицы, динамика ее теплообмена с окружающей средой и химических превращений, будут зависеть от того, является ли скорость обтекания до- или сверхзвуковой, то есть от того, какой режим обтекания реализуется. Режим обтекания частиц во-первых, будет зависеть от того, сформировался ли коллективный скачок перед облаком частиц или частицы обтекаются индивидуально, а во-вторых, от того находится ли частица в аэродинамической тени частиц-соседей. Поэтому актуальным является анализ влияния режима обтекания частиц на их сопротивление, тепловую и скоростную релаксацию в рамках моделей ламинарного и турбулентного течений газа. При этом целесообразно рассмотреть различное взаимное расположение частиц относительно набегающего потока. Использование такого подхода позволит уточнить интегральные эмпирические формулы для коэффициентов сопротивления и теплообмена, более адекватно определить температурные условия вокруг частицы для описания их воспламенения и горения. Детальные сведения об особенностях обтекания, скоростной и тепловой релаксации частиц позволят точнее предсказать динамику их воспламенения и горения.

Целью настоящей работы было численное изучение количественных характеристик взаимодействия проходящих ударных и детонационных волн, распространяющихся по горючей смеси, с системой микрочастиц для определения влияния режима обтекания на коэффициент сопротивления, время тепловой и скоростной релаксации частиц, а также динамику воспламенения смеси. Анализ проведен в рамках прямого расчета задачи взаимодействия проходящих ударных и детонационных волн с частицами с учетом движения частиц и сопряженного теплообмена между газовой фазой и частицами и являются продолжением исследований выполненных в работах [1-3]. В качестве математической модели использовались осредненные по Фавру нестационарные уравнения Навье-Стокса, дополненные SST модификацией $k-\omega$ модели турбулентности и уравнением состояния идеального газа. Для описания процесса горения смеси горючего и окислителя задействован приведенный кинетический механизм. Для численной реализации данной математической модели в рамках пакета инженерного анализа ANSYS Fluent с применением решателя 6DOF создана вычислительная технология прямого моделирования скоростной

и тепловой динамики массива частиц. Для учета столкновений использована модель упругого взаимодействия частиц.

Проведено сравнение данных, полученных в двумерном моделировании динамики частиц под воздействием ударной волны, с расчетом по приближенной модели с использованием обыкновенного дифференциального уравнения для скорости с коэффициентом сопротивления, рассчитанным с помощью корреляции Хендерсона – модель одиночной частицы. Показано, что скорость одиночной частицы хорошо предсказывается в приближенном расчете. Существенные отличия наблюдаются в динамике массива частиц. Даже на начальном этапе взаимодействия до соударения скорость частиц меньше, чем скорость одиночной частицы. Динамика частицы в рассмотренных условиях, прежде всего, определяется коэффициентом сопротивления частиц. Показано, что значения коэффициентов сопротивления для частиц в аэродинамической тени, начиная с момента времени 10^{-4} с существенно ниже приближенного значения. Это означает, что модель одиночной частицы корректна при описании движения лишь действительно одиночной частицы. То есть, когда в ее окрестности отсутствуют другие. При приближении к ней других частиц, то есть при росте взаимного влияния, необходимо внесение в корреляционные формулы для коэффициента сопротивления, поправок учитывающих влияние объемной концентрации частиц.

Проведены оценки соотношения времен скоростной и тепловой релаксации для частиц различного диаметра в потоке продуктов за детонационной волной. Выполнены расчеты для частиц глинозема (Al_2O_3), песка (SiO_2) и карбида вольфрама (WC) диаметром в диапазоне от 1 мкм до 100 мкм. Показано, что для частиц глинозема и песка, обладающих сравнимой плотностью и близкой теплоемкостью, время скоростной релаксации несколько превышает время тепловой релаксации (для 1 мкм частиц примерно в 1.5 раза, для 100 мкм времена практически сравниваются). Для частиц карбида вольфрама, обладающих высокой плотностью и меньшей теплоемкостью, во всем диапазоне диаметров наблюдается превышение времени скоростной релаксации по сравнению со временем тепловой релаксации примерно на порядок с тенденцией некоторого снижения этой разницы при увеличении диаметра. Проведенные оценки позволили судить о применимости модели процесса использованной на следующем этапе. Выполнено моделирование прохождения плоской детонационной волны через решетку неподвижных изотермических частиц. Анализ ударно-волновых конфигураций показал, что в зависимости от поперечного расстояния между частицами в результате формирования скачков перед частицами в потоке за детонационной волной могут возникнуть различные режимы взаимодействия ударных волн. При малых расстояниях – реализуется коллективная конфигурация ударных волн, которая с увеличением расстояния переходит сначала в маховское, а затем в регулярное взаимодействие. Кроме того, при прохождении волны наблюдается срыв детонации с разделением фронта на ударную волну и волну горения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 17-08-00634 и 17-41-540918.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бедарев И.А., Федоров А.В., Фомин В.М. Численный анализ течения около системы тел за проходящей ударной волной // Физика горения и взрыва. 2012. Т.48, No.4. С. 83-92.
2. Бедарев И.А., Федоров А.В. Расчет волновой интерференции и релаксации частиц при прохождении ударной волны // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т.56, No.5. С. 18-29.
3. Бедарев И.А., Федоров А.В. Прямое моделирование релаксации нескольких частиц за проходящими ударными волнами // Инженерно-физический журнал. 2017. Т.90, No.2. С. 450-457.