

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ФРОНТА ВОЛНЫ

А.И. Лопато

*Институт автоматизации проектирования РАН, Москва,
lopato2008@mail.ru*

В последние несколько лет наблюдается рост числа работ, посвященных задачам распространения детонационных волн в неоднородных газовых смесях. Такие задачи представляют интерес не только с точки зрения фундаментальных основ теории детонации, но и с практической точки зрения. Одно из конкретных применений – предотвращение случайного возникновения детонации в шахтах, в изолированных частях которой может накапливаться взрывоопасная смесь. В такой смеси по разным причинам возможно образование градиента концентрации топлива, что, в свою очередь, будет влиять на механизм воспламенения смеси, переход горения в детонацию и ее последующее распространение. Однако основной причиной активных исследований особенностей детонационных процессов в неоднородных смесях является разработка двигателей, основанных на непрерывной вращающейся детонации (см., например, [1]). В таких двигателях окислитель и топливо впрыскиваются в установку отдельно, что приводит к распространению детонации по сильно неоднородной смеси.

Для описания сложного процесса, происходящего в реальных установках, проводятся исследования модельных постановок, при рассмотрении которых проясняются механизмы распространения детонации в неоднородных средах. Можно выделить группы работ (см., например, ссылки в [2]), в которых изучается распространение детонации в плоском канале в среде с переменным продольным и поперечным градиентом концентрации, в среде с переменной плотностью смеси, в среде с областями инертного газа. Отметим недавнюю работу [3], в которой изучается соотношение вкладов следующих двух составляющих в итоговую нелинейную динамику процесса

распространения детонационной волны в неоднородной среде: первая – связана с пульсирующей природой детонационной волны (ДВ) как таковой, проявляющейся и в однородной среде; вторая – обусловлена периодическим изменением параметров перед фронтом лидирующей ударной волны (ЛУВ). Обнаружено, что в зависимости от параметров задачи может происходить как усиление колебаний параметров за фронтом детонационной волны, так и, наоборот, стабилизация по сравнению со случаем однородной среды.

Расчеты ДВ в системе координат фронта детонационной волны имеет ряд достоинств. Так, данный подход требует существенно меньших вычислительных затрат по сравнению с традиционным рассмотрением задачи инициирования и распространения в лабораторной системе координат. Рассматривается некоторая область непосредственно за фронтом ДВ. Подход с переходом в систему координат фронта волны (СКФ) позволяет точно фиксировать параметры непосредственно за фронтом ЛУВ. ЛУВ является фиксированной границей расчетной области и не испытывает численного “размазывания”, в отличие от методов сквозного счета. Кроме того, СКФ гораздо лучше подходит для характеристического анализа поля течения за фронтом ДВ. Характеристический анализ способен дать обоснование реализующихся режимов течения (см., например, [4]).

Целью работы является математическое моделирование распространения детонационной волны по неоднородной смеси с синусоидальным изменением плотности перед фронтом ЛУВ.

Математическая модель основывается на уравнениях Эйлера, записанных в СКФ и дополненных одностадийной кинетикой Аррениуса:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\mathbf{f} - D\mathbf{u}) = \mathbf{s}, \quad x = x^l - \int_0^t D dt$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho v \\ e \\ \rho Z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \rho v \\ p + \rho v^2 \\ (p + e)v \\ \rho v Z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho Q \omega \\ \rho \omega \end{bmatrix},$$

$$e = \rho \varepsilon + \frac{1}{2} \rho v^2, \quad \varepsilon = \frac{p}{\rho(\gamma - 1)}, \quad \omega = -AZ \exp\left(-\frac{E\rho}{p}\right).$$

Обозначения величин, связанных с газовой динамикой и химической кинетикой, являются стандартными. D – скорость ЛУВ. Определяющая система уравнений решается на фиксированном отрезке $[-H; 0]$. Правая граница соответствует фронту ЛУВ. На ней выставляются соотношения Ренкина-Гюгио на скачке, движущемся с текущей скоростью D . Для определения D определяющая система уравнений записывается в характеристической форме вдоль C_+ -характеристики. Длина расчетной области H выбирается достаточно большой, чтобы левая граница не влияла на динамику движения фронта ЛУВ. На левой границе выставляются условия экстраполяции нулевого порядка.

Расчетная область покрывается равномерной расчетной сеткой. Для численного интегрирования определяющей системы уравнений используется явная схема Эйлера для интегрирования по времени, принцип расщепления по физическим процессам конвекции и химической кинетики, конечно-объемная дискретизация объемной конвективной части. Параметры на гранях ячеек определялись в результате кусочно-линейной реконструкции вектора консервативных переменных с помощью ограничителя `minmod`. Численный поток рассчитывается по схеме Куранта-Изаксона-Рис и учитывает неявным образом скорость ЛУВ. Более подробное описание вычислительного алгоритма в части газовой динамики можно найти в [2, 4].

Задача о взаимодействии УВ с синусоидальным возмущением плотности в инертной среде была рассмотрена в [5]. Данная задача (ее называют задачей Шу-Ошера) часто используется для проверки методов расчета течений с волнами детонации. Структура фронта ДВ включает лидирующий скачок и область гладкого изменения параметров за ней. В задаче Шу-Ошера течение также содержит области с гладкими участками и движущиеся разрывы. В начальный момент времени профили плотности, скорости, давления испытывают скачок в точке $x = 0$. Далее происходит формирование волн сжатия, контактных разрывов и других процессов, которые сопровождают течение смеси. В момент времени $t = 1.8$ график плотности имеет вид колеблющейся кривой, разделенной участками с контактными разрывами (КР), волнами сжатия (ВС) и разрежения (ВР), показанными на рис. 1(а). Решение хорошо согласуется с

результатами из [5]. Некоторая неточность в фазе пиков в области КР может быть обусловлена погрешностями оцифровки результатов [5] и неполной идентичностью моментов времени сравнения результатов.

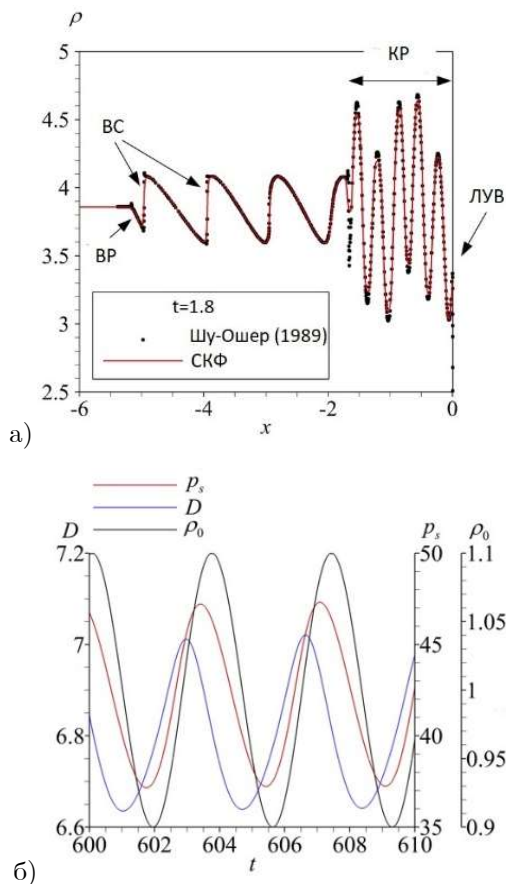


Рис. 1. (а) Рассчитанный профиль плотности задачи Шу-Ошера в момент времени $t = 1.8$; (б) динамика распространения ДВ: эволюция давления за ЛУВ p_s , скорости ЛУВ D и плотности перед ЛУВ ρ_0

Рассматривается задача о распространении ДВ по среде с синусоидально меняющейся плотностью перед фронтом ЛУВ. Параметры смеси, кинетики, синусоидального возмущения плотности взяты из [6]. При отсутствии синусоидально

меняющейся плотности происходит выход детонации на устойчивый режим с параметрами за ЛУВ, близкими к параметрам Чепмена-Жуге. Добавление синусоидального возмущения после момента времени $t_1 = 500.0$ приводит к возникновению пульсаций параметров за фронтом ЛУВ с периодом, соответствующим периоду колебаний плотности перед фронтом, что видно из рис. 1(б). Проводится характеристический анализ для прояснения механизмов пульсаций, связанных с химической кинетикой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект N. 22-71-00113).

Литература

1. С.М. Фролов, В.С. Иванов. Прорыв в теории прямоточных двигателей. Химическая физика, Т.40, N.4, 2021, с. 68–75.
2. Я.Э. Порошина, А.И. Лопато, П.С. Уткин. Характеристический анализ динамики распространения ударной волны в среде с неравномерным распределением плотности. Химическая физика, Т.41, N.8, 2022, с.48–58.
3. A.R. Kasimov, A.Yu. Goldin. Resonance and mode locking in gaseous detonation propagation in a periodically nonuniform medium. Shock Waves, v.31, 2021, pp. 841-849.
4. Ya.E. Poroshina, A.I. Lopato, P.S. Utkin. Non-linear dynamics of pulsating detonation wave with two-stage chemical kinetics in the shock-attached frame. Journal of Inverse and Ill-posed Problems, T.29, N.4, 2021, с.557-576.
5. C.W. Shu, S. Osher. Efficient implementation of essentially nonoscillatory schemes, Journal of Computational Physics, v.83, N.1, 1989, pp.32–78.
6. M. Kim, X.C. Mi, C.B. Kiyanda, H.D. Ng. Nonlinear dynamics and chaos regularization of one-dimensional pulsating detonations with small sinusoidal density perturbations, v.38, N.3, 2021, pp.3701–3708.