

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ТРУБКЕ С РЕАГИРУЮЩИМ ВЕЩЕСТВОМ – ОКТОГЕНОМ

В. В. Ташланов, Д. В. Бегашев, А. В. Ершов

ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

E-mail: vniitf@vniitf.ru

Ударно-волновая трубка (УВТ) является одним из основных элементов неэлектрических систем инициирования, широко применяемых при взрывных работах на земной поверхности, в подземных рудниках и шахтах. УВТ также могут использоваться в системах задействия различных пиротехнических устройств. Рассматриваемая в работе УВТ представляет собой пластиковую трубку (волновод) малого диаметра с нанесенным на ее внутреннюю поверхность слоем октогена, содержащим от 1 до 7% алюминиевой пудры.

Для обеспечения надежной работы УВТ необходимо досконально понимать, как в ней формируются и протекают детонационные процессы. Одним из методов, позволяющих детально исследовать нестационарные детонационные процессы в УВТ, является численное моделирование на основе математических моделей (ММ) многомерных течений химически реагирующих многокомпонентных газовых смесей (ГС) с волнами детонации. В данной работе математическое описание изучаемых процессов основывается на уравнениях RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) [1], модифицированной $k-\omega$ модели турбулентности SST (Shear Stress Transport) Ментера [2] и предложенной двухстадийной кинетической модели термического разложения октогена, включающей прямые химические реакции первого порядка в конденсированной и газовой фазах. Рейнольдсовы напряжения в модели турбулентности SST Ментера связаны со средними параметрами течения согласно гипотезе Буссинеска через кажущуюся скалярную вихревую вязкость μ_t , которая определяется по формуле Брэдшоу [2]. Предлагаемая ММ позволяет моделировать медленные режимы горения – дефлаграции, а также переход к детонации.

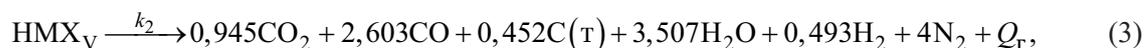
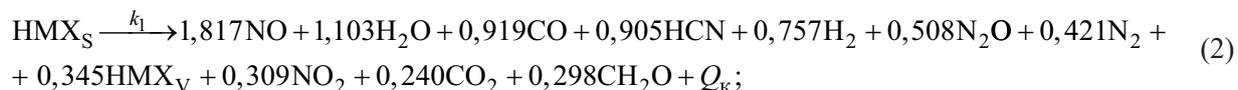
Уравнения RANS замыкаются уравнением состояния для смеси идеальных газов:

$$\bar{p} = R \sum_{i=1}^S M_i^{-1} (\bar{\rho} \tilde{\omega}_i \tilde{T} + \bar{\rho} \omega_i T''') \quad (1)$$

и двухпараметрической моделью турбулентности SST, включающей уравнения переноса для кинетической энергии турбулентности k и удельной скорости диссипации кинетической турбулентной энергии ω [2].

В уравнении (1) приняты следующие обозначения: p – давление, Па; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К); M_i – молекулярная масса i -го компонента ГС, кг/моль; ρ – плотность ГС, кг/м³; ω_i – массовая доля i -го компонента ГС; T – термодинамическая температура, К; S – количество компонентов ГС; символы « $\bar{}$ » и « $\tilde{}$ » соответственно означают осреднение по Рейнольдсу и Фавру, символ « $'''$ » означает флуктуацию Фавра.

Ниже представлена двухстадийная кинетическая модель разложения октогена в конденсированной и газовой фазах, в основу которой лег анализ работ Г. А. Авакяна, Ф. И. Дубовицкого, Б. Л. Корсунского, Н. Е. Ермолина, В. Е. Зарко, А. А. Палецкого и др.:



где НМХ_S – октоген в твердой фазе; НМХ_V – пары октогена; $k_1 = 1,58 \cdot 10^{11} \exp(-158687,3/RT)$ – константа скорости реакции газификации октогена, с⁻¹; $k_2 = 1,58 \cdot 10^{14} \exp(-165386,5/RT)$ – константа скорости реакции термического разложения октогена в газовой фазе, с⁻¹; Q_K , Q_T – тепловые эффекты реакций, Дж/моль.

Тепловые эффекты реакций (2) и (3) рассчитывались по стандартным энтальпиям образования веществ, участвующих в реакциях, с учетом протекания реакций при постоянном объеме.

Численный анализ предложенной ММ изучаемых процессов проводился средствами программного комплекса «ЛОГОС» [3]. На рисунках 1, 2 представлены некоторые результаты численного моделирования горения октогена в УВТ с внутренним диаметром 1,2 мм. Иницирование УВТ моделировалось заданием на входе в волновод массового расхода пороховых газов с температурой 2936 К. Установлено, что переход к детонации происходит по схеме: *дефлаграция* → *кумуляция потока* → *воспламенение (тепловой взрыв)* → *пересжатая детонация* (рис. 1) → *установившаяся спиновая детонация* (рис. 2). Характерным для структуры спиновой детонационной волны является существование максимума давления у стенки – «головы» спина, вращающейся вокруг оси волновода одновременно с поступательным движением фронта детонационной волны. Скорость детонации, определенная по результатам расчетов, удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными по измерению скорости детонации в УВТ.

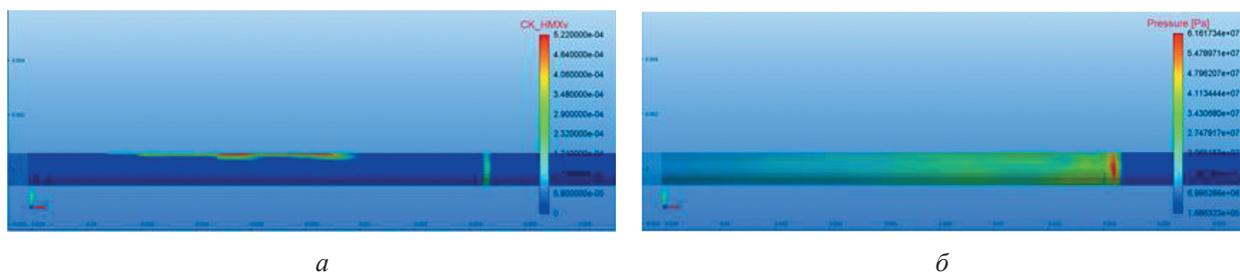


Рис. 1. Распределение параметров процесса термического разложения октогена в УВТ при переходе от дефлаграционного режима горения к детонации:
а – массовая доля паров октогена; *б* – давление в ГС

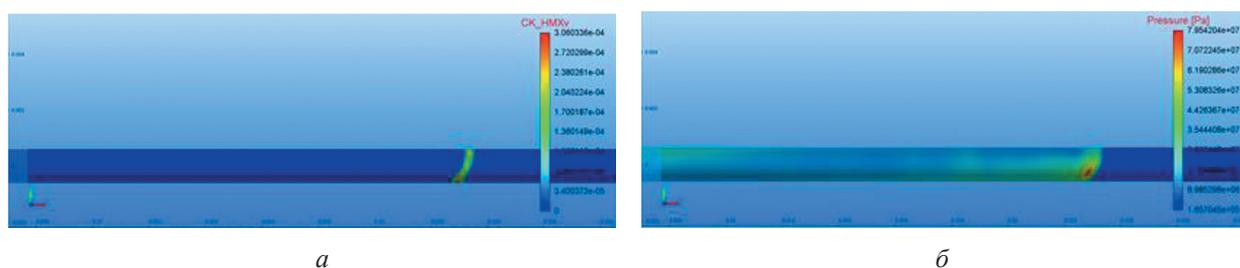


Рис. 2. Распределение параметров процесса термического разложения октогена в УВТ в режиме установившейся спиновой детонации:
а – массовая доля октогена паров; *б* – давление в ГС

Литература

1. **Варнатц, Ю.** Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл ; пер. с англ. Г. Л Агафонова ; под. ред. П. А. Власова. – М. : Изд-во ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.
2. **Menter, F. R.** Ten years of experience with the SST turbulent model [Text] / F. R. Menter, M. Kuntz, R. Lantry ; ed. by K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4. – Begell House Inc, 2003.
3. **Козелков, А С.** Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: Физико-математические модели расчета задач аэрогидродинамики и теплопереноса [Текст] : препринт РФЯЦ – ВНИИЭФ № 111 / А С. Козелков, Ю. Н. Дерюгин, Д. К. Зеленский и др. – Саров : РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2013. – 67 с.