

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ ОБЛАКАМИ ИНЕРТНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Д.А. Тропин, А.В. Федоров

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия*

Исследования подавления детонационных волн в реагирующих газовых смесях инертными наночастицами в настоящее время являются актуальными с точки зрения взрыво- и пожаробезопасности промышленных производств, использующих смеси водорода, метана и силана в качестве рабочего тела. В частности, силан широко используется на предприятиях полупроводниковой промышленности как газообразный источник кремния. Кроме того, силан используют как инициатор воспламенения водорода, который применяется в виде топлива в ракетных двигателях. Поэтому представляется полезным прогнозирование условий протекания и подавления детонационных процессов в рассматриваемых смесях инертными наночастицами.

Физико-математическая постановка задачи. Рассмотрим ударную трубу, заполненную реагирующей газовой смесью (водород, метан, силан и окислитель), а также облаком инертных наночастиц SiO_2 (диаметрами от 10 нм до 100 мкм), расположенным в камере низкого давления (КНД) на некотором расстоянии от мембраны, разделяющей камеры высокого и низкого давления. После разрыва диафрагмы в КНД происходит инициирование ДВ, которая до начала взаимодействия с облаком распространяется в режиме Чепмена-Жуге. Математическая модель механики реагирующей смеси газов и инертных наночастиц представляет собой систему уравнений динамики неравновесной смеси газа и твердых частиц, дополняемая уравнениями детальной химической кинетики, и имеет вид, представленный в [1-3].

Результаты расчетов. Ранее [1-2] нами было установлено, что в рассматриваемых смесях горючих газов с облаками микрочастиц существует два детонационных режима: 1. стационарное распространение ослабленной ДВ при скоростях D меньших D_{CJ} ; 2. подавление ДВ. Расчеты, проведенные в данной работе с облаками инертных наночастиц, показали, что эти два детонационных режима сохраняются и в газозвесах с наночастицами. Однако, в газозвесах водород-кислород с частицами диаметром 1 мкм и метан-кислород с частицами диаметрами от 10 нм до 1 мкм вблизи концентрационного предела реализуется галопирующий режим распространения ДВ. Известно, что галопирующая детонация это регулярно повторяющийся пульсирующий процесс [4]: пересжатая ДВ затухает, фронт воспламенения и горения отстает от замороженной ударной волны, за фронтом замороженной УВ в непрореагировавшем газе происходит инициирование вторичной ДВ (происходит взрыв во взрыве), которая догоняет замороженную УВ с формированием вновь пересжатой ДВ, далее процесс повторяется. Для иллюстрации наблюдаемого нами в газозвеси реагирующих газов и инертных частиц галопирующего режима детонации на рис. 1 показаны распределения давления в ударной трубе, заполненной водород-кислородной смесью с частицами диаметром 1 мкм и объемной концентрацией $m_2 = 2 \cdot 10^{-4}$. Видно, что в газозвеси режим распространения детонации носит периодический характер: происходит подавление детонации с распространением затухающей ударной волны и последующее реиницирование детонации. На рис. 2 показаны распре-

деления давления и концентрации радикала OH сразу после входа ДВ в облако частиц, т.е. на первом периоде распространения галопирующей детонации. Видно, что после входа ДВ в облако частиц происходит ее расщепление на затухающую замороженную ударную волну и фронт воспламенения и горения, передняя граница которого определяется появлением в смеси радикалов OH , отстающий по мере распространения от фронта замороженной ударной волны до некоторого момента времени. После этого момента, в непрореагировавшей смеси газов за фронтом замороженной ударной волны инициируется воспламенение и горение газовой смеси, фронт воспламенения и горения начинает догонять замороженную ударную волну и при их слиянии наблюдается реинициирование детонации.

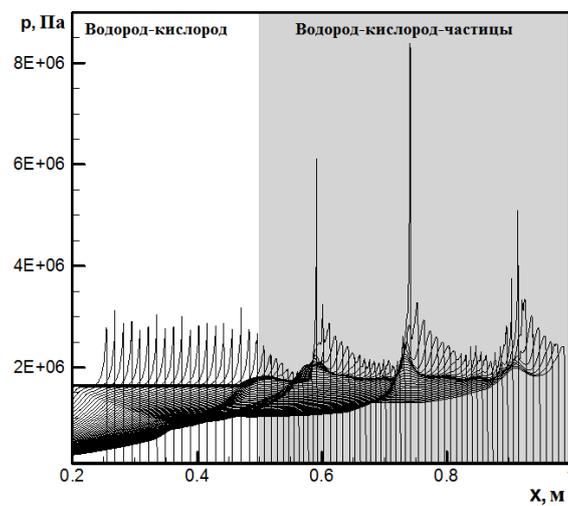


Рис. 1. Распределение давления газа в ударной трубе. Галопирующий детонационный режим.

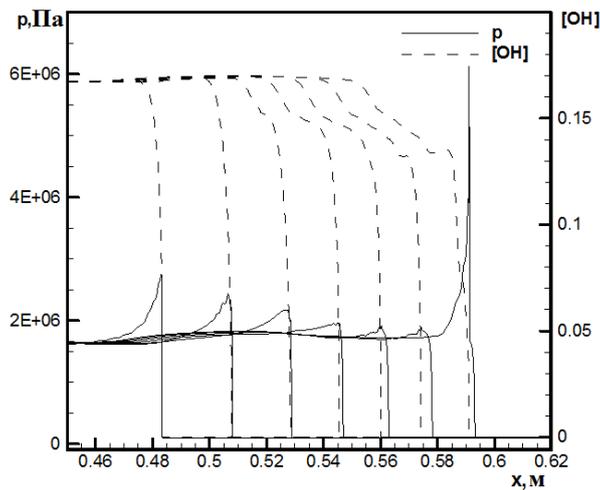


Рис. 2. Распределение давления газа и концентрации радикалов OH в ударной трубе. Галопирующий детонационный режим.

Кроме того, были рассчитаны концентрационные пределы детонации, т.е. минимальная объемная концентрация частиц, необходимая для подавления детонации, которые составили:

- Водород-кислородная смесь: частицы диаметрами 10 нм и 100 нм – $m_2^* = 6 \cdot 10^{-4}$,
- Метан-кислородная смесь: частицы диаметром 10 нм – $m_2^* = 1.5 \cdot 10^{-3}$, частицы диаметром 100 нм – $m_2^* = 1.3 \cdot 10^{-3}$,
- Силано-воздушная смесь: частицы диаметром 10 нм – $m_2^* = 5 \cdot 10^{-4}$, частицы диаметром 100 нм – $m_2^* = 5 \cdot 10^{-4}$.

Выводы. На основе предложенных физико-математических моделей для описания процессов распространения, ослабления и подавления детонации в смесях водород-кислород, метан-кислород и силан-воздух инертными наночастицами найдены концентрационные пределы детонации в рассматриваемых газовзвесах. Выявлено, что в газовзвесах с наночастицами существуют те же типы детонационных течений, что и в газовзвесах микрочастиц: 1. стационарное распространение ослабленной ДВ при скоростях меньших скорости Чепмена-Жуге; 2. подавление ДВ. Кроме того реализуется и третий галопирующий режим в газовзвесах водород-кислород с частицами диаметром 1 мкм и метан-кислород с частицами диаметрами от 10 нм до 1 мкм вблизи концентрационного предела.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект № 16-19-00010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тропин Д.А., Федоров А.В. Физико-математическое моделирование подавления детонации инертными частицами в смесях метан-кислород и метан-водород-кислород // Физика горения и взрыва. 2014. Т.50, №5, с. 48-52.
2. Федоров А.В., Тропин Д.А. Моделирование прохождения детонационной волны через облако частиц в двухскоростной, двухтемпературной постановке // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, №2, с. 61-70.
3. Тропин Д.А., Федоров А.В. Физико-математическое моделирование воспламенения и горения силана в проходящих и отраженных ударных волнах // Физика горения и взрыва. 2015. Т.51, №4, с. 37-45.
4. Ульяновский В.Ю. Исследование галопирующего режима газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17. № 1, с. 118-124.