

## КОНДЕНСАЦИЯ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ГАЗОВЫХ И ГАЗОПЫЛЕВЫХ СМЕСЯХ

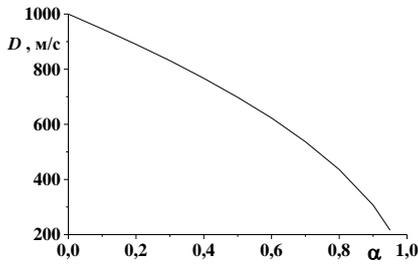
П.А. Фомин

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

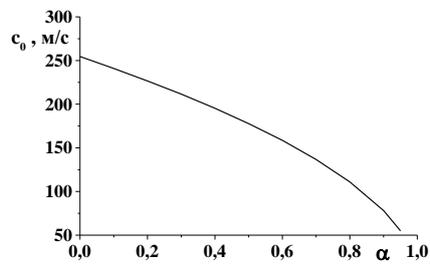
**Конденсация паров горючего за фронтом ударной волны, распространяющейся по газу.** В работе [1] показана принципиальная возможность конденсации паров тяжелого углеводородного горючего за фронтом ударной волны, распространяющейся в переобогащенных горючим газовых смесях (на примере смеси паров циклогексана с кислородом и азотом). Конденсация может существенно (до нескольких раз) увеличить содержание окислителя в газе. В результате смеси, начальная концентрация паров горючего в которых превышает верхний концентрационный предел воспламенения, могут, тем не менее, взрываться, если конденсация сдвинет состав смеси в область воспламенения. Конденсация за фронтом ударной волны связана с тем, что в рассматриваемых смесях показатель адиабаты близок к единице. В этом случае общее давление, и, соответственно, парциальное давление паров горючего на фронте ударной волны растет, в то время как температура и, соответственно, давление насыщенных паров горючего остаются примерно постоянными. Что и приводит к конденсации. Принципиальная возможность конденсации паров горючего за фронтом ударной волны нетривиальна, поскольку для большинства газовых смесей условие близости показателя адиабаты к единице несправедливо. Таким образом, конденсация паров горючего за фронтом ударной волны в большинстве газовых смесей невозможна, так как увеличение парциального давления паров вследствие сжатия меньше, чем увеличение давления насыщенных паров из-за скачка температуры [2]. Возможная конденсация паров должна быть принята во внимание при обеспечении пожаро- и взрывобезопасности промышленных зданий и сооружений, в которых могут иметь место утечки и разливы тяжелых жидких углеводородов с высоким давлением насыщенных паров.

**Конденсация паров горючего в ударной волне, распространяющейся по облаку химически инертных микрочастиц.** Выше рассмотрена конденсация за фронтом ударной волны в газовых смесях. Представляется интересным рассмотреть распространение ударной волны в аналогичных газовых смесях со взвешенным в них облаком твердых химически инертных микрочастиц. Положим, что микрочастицы достаточно малы, чтобы находиться в тепловом и механическом равновесии с газом, т.е. температура и скорость частиц и газа в любой момент времени и в любой точке пространства одинаковы. Наличие микрочастиц (потери энергии газа на нагрев и ускорение микрочастиц) должно привести к тому, что при одном и том же числе Маха ударной волны температура за ее фронтом будет ниже, чем в случае чисто газовой смеси. И тем ниже, чем больше концентрация микрочастиц. Это приведет к сильному понижению давления насыщенных паров, поскольку оно экспоненциально зависит от температуры. Парциальное давление паров горючего при этом также уменьшится, но не так сильно по сравнению с уменьшением давления насыщенных паров. Таким образом, при наличии химически инертных микрочастиц следует ожидать существенного увеличения степени переохлаждения, конденсации большей массы паров горючего (и, соответственно, большего увеличения мольной доли окислителя в газовой фазе) и уменьшения характерного времени конденсации по сравнению с рассмотренным выше случаем чисто газовой смеси.

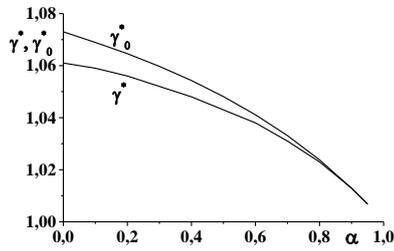
В качестве примера проведен расчет параметров одномерной стационарной ударной волны с постоянными за фронтом параметрами в смеси равномерно распределенных по пространству химически инертных микрочастиц песка ( $\text{SiO}_2$ ) и переобогащенной парами циклогексана газовой смеси. Газовая смесь имеет состав:  $0,076 \text{ O}_2 + 0,351 \text{ N}_2 + 0,573 \text{ C}_6\text{H}_{12}$ , начальное давление и температура равны  $P_0 = 1,3 \text{ МПа}$ ,  $T_0 = 439 \text{ К}$ . На рисунке представлены результаты расчета параметров ударной волны при различной величине массовой доли  $\alpha$  микрочастиц в смеси;  $T$  – температура,  $c_0$  – скорость звука,  $P^f$  – парциальное давление паров циклогексана,  $P_{sat}^f$  – давление его насыщенных паров,  $\theta$  – показатель переохлаждения. Величина  $\alpha = 0$  соответствует газовой смеси без микрочастиц. Расчет проводился при фиксированном числе Маха, равном 3,9275. Для газовой смеси без частиц это соответствует скорости ударной волны, равной  $D = 550 \text{ м/с}$ . Показатель адиабаты  $\gamma^*$  рассматриваемой двухфазной смеси рассчитывался по формуле, приведенной в [3]. Индекс “0” соответствует параметрам перед ударной волной.



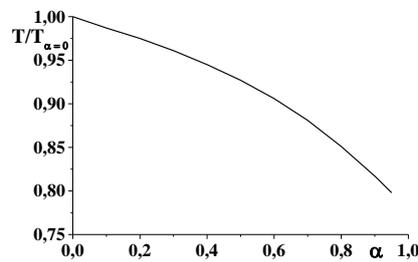
a



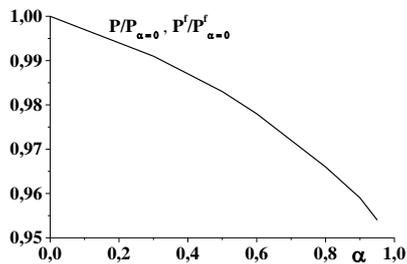
б



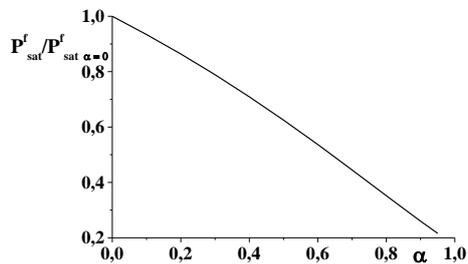
в



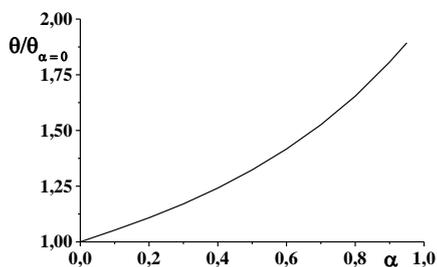
г



д



е



Жс

Рис. 1. Параметры за фронтом ударной волны в смеси газа с химически инертными микрочастицами песка. Конденсация паров горючего не учитывалась. Состав газовой смеси:  $0,076 \text{ O}_2 + 0,351 \text{ N}_2 + 0,573 \text{ C}_6\text{H}_{12}$ .

Из рисунка видно, что в соответствии с приведенными в данном параграфе рассуждениями, увеличение массовой доли микрочастиц в смеси до величины  $\alpha = 0.95$  ведет к увеличению показателя переохлаждения в 2 раза (рис. 1(Жс)) и соответствующему увеличению массы паров, переходящих в газ. Отметим, что малость скорости звука в двухфазной смеси по сравнению со скоростью звука в воздухе (330 м/с) связана с малой величиной показателя адиабаты и относительно большой молярной массой газа (рис. 1(б, в)). Увеличение массовой доли конденсированной фазы ведет и к уменьшению характерного времени конденсации, поскольку оно уменьшается с ростом параметра переохлаждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (код проекта 17-03-01351).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fomin P.A., Chen J.-R.** Explosion safety aspects of shock wave induced condensation in fuel-rich gaseous mixtures. // *Combustion Science and Technology*, 2008. Vol. 180, No. 7. P. 1317-1333.
2. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Гидродинамика (Теоретическая физика, т. VI), Москва: Наука, 1986.
3. **Fomin P.A., Chen J.-R.** Effect of chemically inert particles on thermodynamic characteristics and detonation of a combustible gas. // *Combustion Science and Technology*, 2009. Vol. 181, No. 8. P. 1038-1064.