

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ ОБЛАКАМИ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ И КАПЕЛЬНОЙ ВЗВЕСЬЮ

С.А. Лаврук, Д.А. Тропин

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

Вопросы взрыво-пожаробезопасности промышленных производств привлекают повышенное внимание. Так, при использовании на производствах гомогенных и гетерогенных реагирующих сред происходят аварийные взрывы, приводящие к большим разрушениям. Поэтому ослабление и гашение взрывных и детонационных волн является одним из приоритетных направлений исследований в данной области. Одним из способов, позволяющих ослабить или погасить детонацию, является создание облаков твердых инертных частиц или взвесью инертных жидких капель в поле течения. В работах [1–4] было показано влияние химически инертных твердых частиц на параметры детонационных волн в реагирующих газовых смесях. В работах [5–7] рассматривался вопрос подавления гетерогенной детонации в плоском канале облаками инертных частиц.

Ранее при моделировании гетерогенной детонации алюминиевых частиц применялась модель диффузионного горения. Однако, в работе [8] показано, что в диапазоне диаметров алюминиевых частиц, близких к 3.5 мкм, происходит переход от диффузионного режима горения к кинетическому. В данной работе исследовалось взаимодействие детонационных волн в газозвесах частиц алюминия диаметром менее 1 мкм в воздухе облаками инертных частиц оксида алюминия и взвесью инертных жидких капель воды с учетом переходного режима горения от диффузионного к кинетическому.

Математическая модель детонации частиц алюминия в кислороде основана на представлениях многоскоростных многотемпературных континуумов. В двумерном нестационарном течении основные уравнения, описывающие детонационные процессы в монодисперсных газозвесах частиц алюминия, представлены в [5]. В данной работе используется математическая модель бидисперсной гетерогенной среды, одна фракция которой реагирующая (индекс  $i = 2$ ), а вторая инертная ( $i = 3$ ). Модель горения частиц алюминия с учетом переходного режима горения была представлена в [9].

При использовании в качестве инертной фазы капель воды необходимо учитывать их испарение и дробление в ходе взаимодействия с ударной или детонационной волной [10]. Дробление капель описывается по формуле срыва погранслоя:

$$\frac{dm_{op}}{dt} = -2\pi(3\pi)^{\frac{1}{3}} \rho_{ж} \left( \frac{\rho}{\rho_{ж}} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{v_1}{v_3} \right)^{\frac{1}{6}} v_3^{\frac{1}{2}} (u_k - u)^{\frac{1}{2}} a^{\frac{3}{2}} \frac{1}{m_{op}}.$$

А испарение капель описывается по формуле:

$$\frac{dm_{исп}}{dt} = -(4\pi)^{\frac{2}{3}} 3^{\frac{2}{3}} \frac{1}{8} \rho_{ж}^{\frac{2}{3}} m_{исп}^{\frac{1}{3}} K_v (1 + 0.27 Re^{0.5}),$$

где  $\rho_{ж}$  – истинная плотность жидкости,  $v_1, v_3$  – вязкость газа и жидкости,  $u_k, u$  – скорость капли и жидкости,  $K_v$  – константа испарения,  $Re$  – число Рейнольдса.

Аналогично большинству количественных описаний деформаций и дробления капель натекающим потоком, считаем, что капля с первоначальным диаметром  $d_3$  деформируется в эллипсоид вращения с малой  $b$  и большой  $a$  полуосями. Деформация описывалась по [10,11]:

$$\frac{dz}{dt} = \left( -\frac{3}{16} \frac{(u_k - u)^2}{b} \frac{\rho}{\rho_{жс}} + \frac{3}{8} C_D \frac{\rho}{\rho_{жс}} \frac{(u_k - u)^2}{b} z \right) \frac{1}{u_k},$$

где коэффициент сопротивления  $C_D$

$$C_D = \begin{cases} 27 \text{Re}^{-0.84} & \text{при } \text{Re} \leq 80 \\ 0.27 \text{Re}^{0.21} & \text{при } 80 < \text{Re} \leq 10^4, \\ 2 & \text{при } \text{Re} \leq 10^4 \end{cases}$$

где  $\frac{db}{dx} = z$ .

Более подробная информация о модели дробления капель представлена в работах [10,11].

При взаимодействии детонационной волны с облаками инертных частиц были получены следующие различные детонационные режимы. При концентрации инертных частиц  $m_3 = 10^{-4}$  вне зависимости от их диаметра не происходит срыва детонационного горения, ячеистая структура сохраняется (рис. 1а). При увеличении концентрации инертных частиц  $m_3$  до  $5 \cdot 10^{-4}$  происходит перестроение течения, ячеистая структура видоизменяется – размеры детонационных ячеек увеличиваются (Рис. 1б). Срыв детонации в газозвесах микро- и наночастиц алюминия наблюдается при увеличении концентрации инертных частиц до  $m_3 = 10^{-3}$  и выше, в результате чего происходит разрушение ячеистой структуры, а также расщепление детонационной волны на замороженную ударную волну и отстающий от нее фронт горения (Рис. 1в).

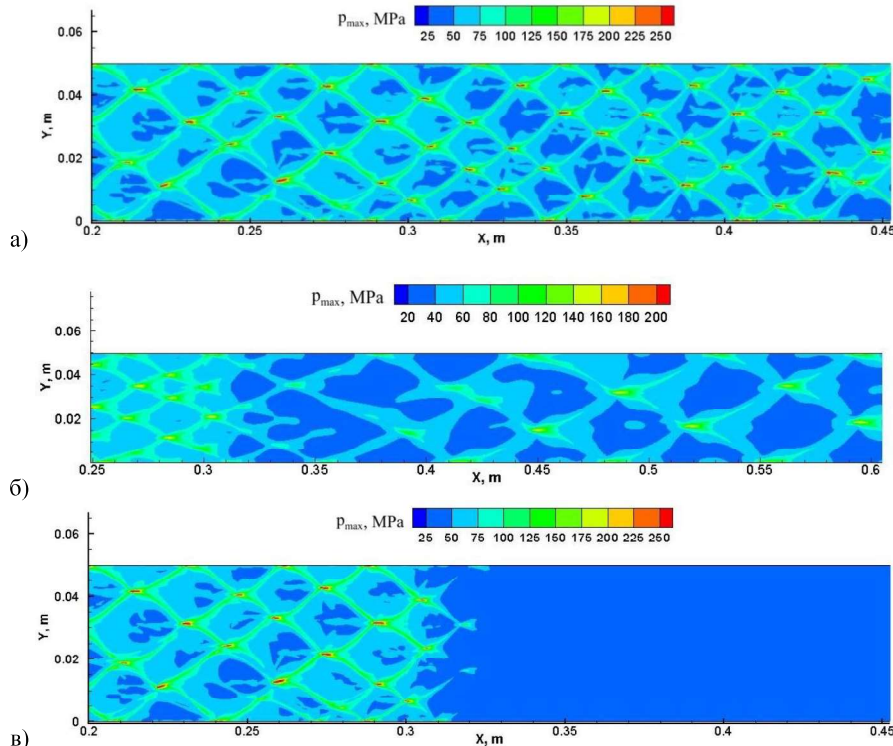


Рис. 1. Распространение детонации при условиях а)  $d_2=200$  нм,  $d_3=5$  мкм,  $m_3=10^{-4}$ , б)  $d_2=1$  мкм,  $d_3=1$  мкм,  $m_3=5 \cdot 10^{-4}$ , в)  $d_2=200$  нм,  $d_3=5$  мкм,  $m_3=10^{-3}$ .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-08-00156-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fedorov A. V., Tropin D.A.** Determination of the critical size of a particle cloud necessary for suppression of gas detonation // *Combust. Explos. Shock Waves*, 2011. Vol. 47, № 4. P. 464–472.
2. **Tropin D.A., Fedorov A. V.** Mathematical modeling of detonation wave suppression by cloud of chemically inert solid particles // *Combust. Sci. Technol.* 2014. Vol. 186, № 10–11. P. 1690–1698.
3. **Bedarev I.A., Tropin D.A.** Mathematical modeling of the suppression of cellular detonation waves in a hydrogen-air mixture by inert particle clouds // *AIP Conf. Proc.* 2018. Vol. 2027.
4. **Bedarev I.** Micro-level modeling of the detonation wave attenuation by inert particles // *Therm. Sci.* 2019. Vol. 23. P. 439–445.
5. **Fedorov A. V., Kratova Y. V.** Calculation of detonation wave propagation in a gas suspension of aluminum and inert particles // *Combust. Explos. Shock Waves*, 2013. Vol. 49, № 3. P. 335–347.
6. **Kratova Y. V., Fedorov A. V.** Interaction of a heterogeneous detonation wave propagating in a cellular regime with a cloud of inert particles // *Combust. Explos. Shock Waves*, 2014. Vol. 50, № 2. P. 183–191.
7. **Khmel' T.A., Fedorov A. V.** Description of dynamic processes in two-phase colliding media with the use of molecular-kinetic approaches // *Combust. Explos. Shock Waves*, 2014. Vol. 50, № 2. P. 196–207.
8. **Sundaram D.S., Yang V., Zarko V.E.** Combustion of nano aluminum particles (Review) // *Combust. Explos. Shock Waves*. 2015. Vol. 51, № 2. P. 173–196.
9. **Khmel T.A., Fedorov A. V.** Modeling of Plane Detonation Waves in a Gas Suspension of Aluminum Nanoparticles // *Combust. Explos. Shock Waves*, 2018. Vol. 54, № 2. P. 189–199.
10. **Nikolaev Y.A., Fomin P.A.** A model for stationary heterogeneous detonation in a gas-droplet mixture // *Combust. Explos. Shock Waves*, 1984. Vol. 20, № 4. P. 447–455.
11. **Borisov A.A. et al.** Deformation of drops in the reaction zone of heterogeneous detonation // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1973. Vol. 11, № 5. P. 741–746.