

УДК 532.5

ПОДАВЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ ОБЛАКА ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ ЧАСТИЦ

А. М. Тахсини

Школа машиностроения Иранского университета науки и техники, Тегеран, Иран
E-mail: am_tahsini@iust.ac.ir

С использованием многокомпонентной двухфазной модели для реагирующего сжимаемого поля потока, включающего облака твердых химически инертных частиц, исследуется влияние облака разнообразных частиц, находящегося вниз по потоку от ударной волны, на подавление детонационной волны. Детонационная волна моделируется для стехиометрической смеси водорода и кислорода с использованием полной химической модели. Разработана численная программа, в которой используются схема конечных объемов, метод направленных разностей, а также метод Сореля. Путем численного расчета получено значение результирующего давления при лобовом столкновении двух аналогичных волн, которое моделирует соударение детонационной волны с жесткой стенкой. Поскольку при ударе волны о стенку давление существенно увеличивается, для его понижения можно использовать многокомпонентное облако частиц как в случае малого, так и в случае длительного времени воздействия.

Ключевые слова: детонационная волна, соударение, многокомпонентное облако частиц, численное моделирование, подавление.

DOI: 10.15372/PMTF20200106

Введение. Газовая детонация представляет собой режим быстрого сверхзвукового горения, при котором химическая реакция инициируется прямой ударной волной. Таким образом, это самоподдерживающаяся ударная волна, распространяющаяся в горючей смеси компонентов топлива и окислителя, в которой происходят экзотермические реакции. Большая скорость распространения детонационных волн способствует увеличению скоростей химических реакций в поле течения, поэтому химическая энергия реагирующих веществ полностью высвобождается в узкой области вниз по потоку от ведущей нестационарной ударной волны. Заметим, что детонационные волны являются эффективным режимом горения, при котором высвобождается вся химическая энергия горючей смеси и производится меньшее количество энтропии, чем в других процессах, происходящих при постоянном давлении [1]. Инициирование, развитие, устойчивость, структура, химические механизмы и многомерная динамика детонационных волн исследованы недостаточно.

В некоторых отраслях промышленности существует значительный риск возникновения детонации. Поэтому исследование условий возникновения детонации в горючих смесях имеет большое значение для управления инициированием, распространением и ослаблением детонационных волн. Кроме того, результаты исследований соударения волны с жест-

кой стенкой и увеличения давления при этом могут быть использованы при конструировании защитных барьеров.

Использование облака инертных частиц для подавления детонации является одним из эффективных способов предотвращения аварий. Данный способ основан на том, что вследствие дисперсии некоторых химически инертных частиц вниз по потоку от детонационной волны значительная доля количества движения и энергии волны может быть поглощена этими частицами. Это позволяет тушить пламя и ослаблять ударную волну. Изучению детонации в полях двухфазных течений посвящено много работ. В [2] выполнены экспериментальные исследования ускорения частиц при воздействии движущейся детонационной волны и влияния начального положения частиц на максимальную скорость их движения. В работе [3] численно исследовано влияние концентрации частиц на скорость и затухание детонационной волны.

В [4] экспериментально изучалось влияние концентрации частиц в облаке на распространение детонации во взрывоопасных газовых смесях. Установлено, что при некоторых размерах и нагрузках частиц за главным фронтом детонационной волны может образоваться еще один разрыв давления даже в случае облаков инертных частиц. В работе [5] численно исследовалось подавление волн с помощью инертного облака, при этом моделировалось течение нереагирующей смеси в ударной трубе. В [6] при аналитическом исследовании влияния термодинамических свойств частиц на затухание обнаружено, что облака частиц с высокими удельными температурами в большей степени способствуют затуханию. В работе [7] проведено численное моделирование влияния облаков частиц на детонационные волны с использованием химических реакций для девяти компонентов.

В проведенных исследованиях возможности ослабления детонации с использованием облака частиц полагалось, что оно существует в базовых реакционных смесях. Однако обычно детонационная волна инициируется в потенциально горючем поле и должна подавляться ниже по потоку, где отсутствует реагирующая газовая смесь. В работе [8], в которой численно исследовано влияние облака частиц, существующего в воздухе, на подавление сформированной детонационной волны в стехиометрической водородно-кислородной смеси, показано, что наличие частиц в потоке воздуха приводит к более интенсивному подавлению волн и значительному уменьшению размеров области затухания детонации, кроме того, использование частиц малого размера более эффективно на малых интервалах времени, а крупные частицы более эффективны на больших временных интервалах.

Анализ детонационного воздействия и его последствий очень важен с точки зрения безопасности. При ударе детонационной волны о стенку образуется отраженная ударная волна, которая мгновенно приводит поток за детонационной волной в состояние покоя на стенке. Изначально эта волна имеет давление, существенно превышающее максимальное давление падающей детонационной волны. Несмотря на то что имеется ряд исследований отражения детонационной волны (см., например, работу [9], в которой изучалось отражение детонационной волны от жесткой стенки в газопылевых смесях), результирующее повышение давления на стенке, непосредственно определяющее силу волны, детально не рассматривалось. В настоящей работе исследовано подавление волн с помощью облака из различных частиц в потоке воздуха и облака из одинаковых частиц, а также получена точная величина результирующего повышения давления вследствие воздействия детонационной волны на жесткую стенку.

1. Численное моделирование. Основные уравнения для сжимаемых и реагирующих компонентов двухфазного поля, представляющие собой уравнения сохранения массы, количества движения, энергии и неразрывности компонент в газовой фазе, а также уравнения сохранения массы, количества движения и энергии твердых фаз рассматриваются в одномерном случае. Полагается, что частицы являются сферическими и не сталкиваются

ся, каждая фаза частиц не влияет на другие фазы, при этом не учитываются объем частиц и сила тяжести. Основные уравнения, представляющие собой законы сохранения, имеют вид

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial (\mathbf{F} + \mathbf{F}_v)}{\partial x} = \mathbf{G},$$

где t — время; x — пространственная координата,

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho_g \\ \rho_g u_g \\ \rho_g e_g \\ \rho_g m_j \\ \rho_{p_i} \\ \rho_{p_i} u_{p_i} \\ \rho_{p_i} h_{p_i} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho_g u_g \\ \rho_g u_g u_g + p \\ \rho_g u_g h_g \\ \rho_g u_g m_j \\ \rho_{p_i} u_{p_i} \\ \rho_{p_i} u_{p_i} u_{p_i} \\ \rho_{p_i} u_{p_i} h_{p_i} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{xx} \\ q_x - u_g \tau_{xx} \\ \rho_g D_g m_{jx} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sum F_{p_i} \\ \sum (Q_{p_i} + u_{p_i} F_{p_i}) \\ \dot{\omega}_j \\ 0 \\ -F_{p_i} \\ -Q_{p_i} - u_{p_i} F_{p_i} \end{bmatrix},$$

ρ_g — плотность газовой фазы; u_g — скорость газовой фазы; e_g — удельная полная энергия газовой фазы; m_j — массовая доля j -го компонента; ρ_{p_i} — плотность i -й фазы частиц; u_{p_i} — скорость i -й фазы частиц; h_{p_i} — удельная полная энтальпия i -й фазы частиц; p — давление; h_g — удельная полная энтальпия газовой фазы; τ_{xx} — касательное напряжение; D_g — коэффициент диффузии массы компонентов; $\dot{\omega}_j$ — массовая скорость производства j -го компонента; F_{p_i} — сила взаимодействия газа и частиц i -й фазы в единице объема; Q_{p_i} — скорость теплопередачи между газом и частицей i -й фазы в единичном объеме.

Перенос количества движения и тепла между газом и фазами частиц учитывается с использованием уравнений

$$F_{p_i} = n_{p_i} \frac{1}{2} \rho_g \pi r_{p_i}^2 C_d (u_{p_i} - u_g) |u_{p_i} - u_g|, \quad Q_{p_i} = 4n_{p_i} \pi r_{p_i}^2 h (T_{p_i} - T_g),$$

где n_{p_i} — количество частиц i -й фазы в единичном объеме; r_{p_i} — радиус частицы i -й фазы; C_d — коэффициент сопротивления; h — коэффициент теплопередачи.

Реакция между водородом и кислородом описывается с помощью уравнений химической кинетики [10]. Поэтому для девяти химических компонентов H_2 , H_2O , OH , H_2O_2 , N_2 , H , O , O_2 , HO_2 должны численно решаться уравнения сохранения для восьми компонентов и уравнение для полной массовой доли. При наличии трех различных фаз частиц в многокомпонентном облаке необходимо решать 20 совместных уравнений.

В разработанной программе для дискретизации приведенных выше уравнений используется метод конечных объемов, в котором искомые величины отнесены к центрам ячеек. Невязкие потоки газовой фазы вычисляются по схеме AUSM⁺ [11], каждая фаза частиц моделируется с помощью метода, описанного в [12]. Для верификации данной вычислительной программы используется ряд задач о реагирующих и нереагирующих течениях [13, 14], а также некоторые данные о двухфазных течениях [8].

2. Результаты исследования и их обсуждение. Исследуется ослабление детонационной волны в воздухе с помощью многокомпонентного облака частиц и однокомпонентного облака. Длина области рассматриваемого течения равна 20 см, детонация инициируется непосредственно в горючей однофазной стехиометрической газовой смеси водорода и кислорода. Иницирующий газ находится в узкой области вблизи задней торцевой стенки. Температура и давление данного газа соответственно равны 3000 К и 10^6 Па. Таким образом создается область детонации, которая движется вниз по потоку. Определяется сетка, при использовании которой результаты численного моделирования не зависят от дальнейшего измельчения ее шагов. Показано, что достаточно сетки с 3000 узлов. В этом случае

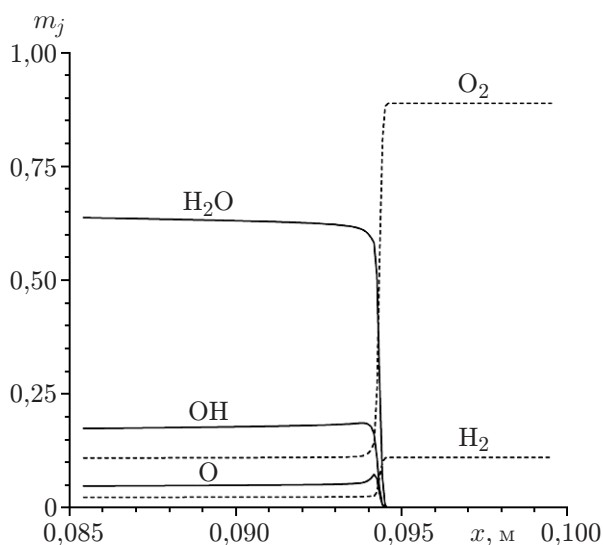


Рис. 1

Рис. 1. Массовые доли компонентов вблизи детонационной волны

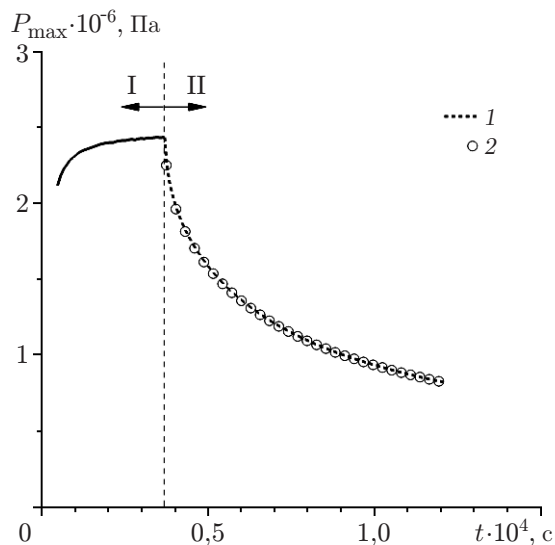


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость максимального давления от времени при распространении детонационной волны в воздухе (1) и азоте (2):

I — детонационная волна, II — отраженная волна

максимальные скорость и температура не зависят от дальнейшего измельчения сетки. Результаты вычислений показывают, что скорость детонационной волны равна 2860 м/с, максимальное давление поля течения — $2,43 \cdot 10^6$ Па. Обе эти величины хорошо согласуются с данными [15].

При входе детонационной волны в воздух топливо отсутствует, химические реакции затухают, и волна постепенно ослабевает. Несмотря на то что не все реагирующие вещества расходуются за детонационной волной (рис. 1) и некоторые реакции продолжаются даже после ее входа в чистый воздух, они больше не могут поддерживать распространение волны. Поэтому устранение кислорода из воздуха ниже по потоку от сгенерированной детонационной волны неэффективно для подавления волны. Это проверялось перед исследованием влияния частиц на подавление детонационной волны с использованием чистого азота вместо воздуха. В области, в которой осуществляется подавление, температура и давление соответственно равны 300 К и 10^5 Па. На рис. 2 приведена зависимость максимального давления от времени, подтверждающая, что использование нейтрального газа вниз по потоку не оказывает влияния на ослабление детонации.

В [8] показано, что использование облака частиц в воздухе вниз по потоку усиливает подавление волны в тех случаях, когда размер частиц, плотность облака и плотность материала хорошо подобраны. Кроме того, для конкретных значений плотностей облака и материала показано, что поведение поля течения зависит не только от значений указанных величин, но и от времени: частицы меньшего размера более эффективно подавляют волну в течение малого периода времени, а частицы большего размера — в случае длительного воздействия. Поэтому использование облака из многокомпонентной смеси частиц может обеспечивать более эффективное ослабление, чем однокомпонентное облако, поскольку такое облако действует в течение и малых, и больших периодов времени после детонации.

Используя разработанную расчетную программу, можно найти наиболее эффективное распределение частиц для подавления детонационной волны на малых расстояниях. Было

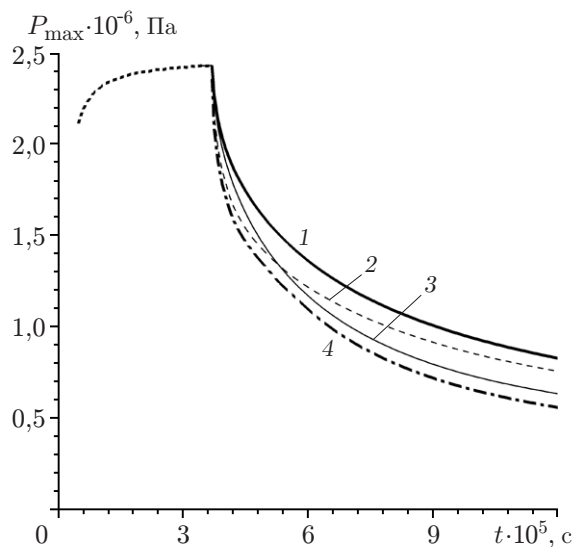


Рис. 3

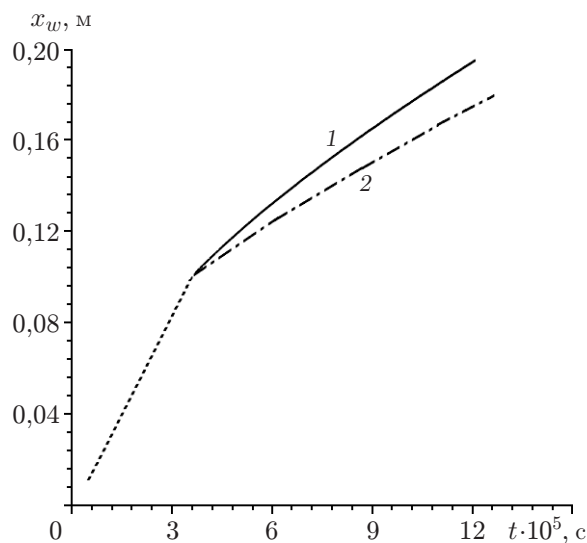


Рис. 4

Рис. 3. Зависимость максимального давления от времени в чистом воздухе (1) и при использовании многокомпонентного облака частиц различного размера и плотности (2–4):

2 — $\rho_p = 0,3 \text{ кг/м}^3$, $r_p = 1 \text{ мкм}$, $\rho_s = 1500 \text{ кг/м}^3$; 3 — $\rho_p = 0,3 \text{ кг/м}^3$, $r_p = 3 \text{ мкм}$, $\rho_s = 1500 \text{ кг/м}^3$; 4 — $\rho_{p_i} = 0,1 \text{ кг/м}^3$, $r_{p_i} = 1, 1, 3 \text{ мкм}$, $\rho_{s_i} = 1500, 4500, 1500 \text{ кг/м}^3$

Рис. 4. Зависимость положения волны от времени в чистом воздухе (1) и при использовании многокомпонентного облака частиц (2)

рассмотрено несколько значений плотностей материалов и размеров частиц в предположении постоянной общей плотности облака частиц. Одним из подходящих распределений, полученных после проведения ряда пробных расчетов, является трехкомпонентное облако, содержащее частицы размером 1, 1, 3 мкм с плотностями материалов соответственно 1500, 4500, 1500 кг/м³. Плотность частиц каждого вида в облаке составляла 0,1 кг/м³, общая плотность частиц в облаке равна 0,3 кг/м³, что хорошо согласуется с результатами [8].

Зависимости максимального давления поля течения и положения волны от времени представлены соответственно на рис. 3, 4. Видно, что использование многокомпонентного облака частиц обеспечивает лучшее ослабление детонационной волны, чем однокомпонентное облако, в случае как малых, так и больших периодов воздействия. Результаты, полученные при использовании подходящего распределения частиц переменных размеров и переменной плотности, показывают, что максимальное давление поля течения уменьшается до значения, равного 1/3 максимального давления детонационной волны, когда она проходит расстояние 4,1 см в многокомпонентном облаке. При этом данное расстояние составляло 9,76 см в случае чистого воздуха и 5,49 см в случае однокомпонентного облака [8], т. е. давление уменьшается на 58 % по сравнению со случаем чистого воздуха и на 25 % по сравнению со случаем однокомпонентного облака. Это имеет большое значение с точки зрения безопасности при разработке высокоэффективных систем контроля. Как отмечено выше, при ударе детонационной волны о стенку давление значительно больше максимального давления детонационной волны. Поэтому в данной работе исследуется удар детонационной волны о жесткую стенку.

На рис. 5 показана схема течения, где сгенерированная детонационная волна достигает жесткой стенки и отражается от нее. Как указывалось выше, давление падающей волны

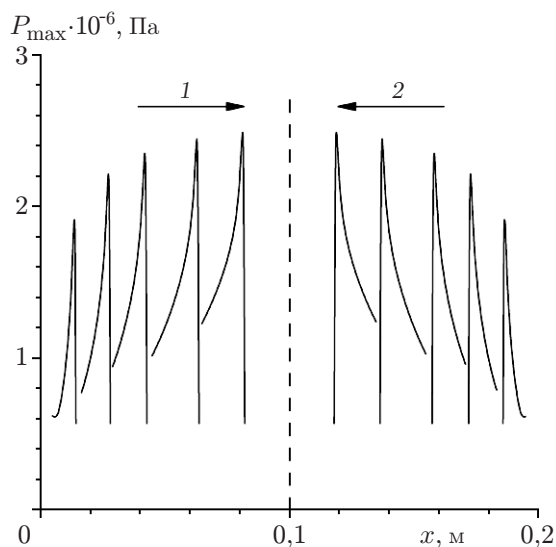


Рис. 5

Рис. 5. Распределение максимального давления при сближении детонационных волн, распространяющихся вправо (1) и влево (2)

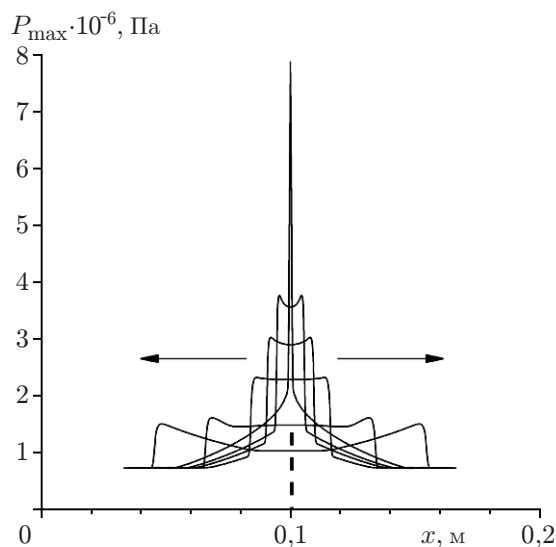


Рис. 6

Рис. 6. Распределение максимального давления в прошедших (отраженных) волнах

приблизительно равно $2,43 \cdot 10^6$ Па. В действительности отраженная волна создает более высокое давление на стенке. Результаты вычислений показывают, что при исследовании отражения детонационной волны от стенки имеются численные ошибки, генерируемые граничными условиями на стенке, поэтому для точного расчета давления лучше моделировать лобовое столкновение двух аналогичных детонационных волн. На рис. 5 показана эволюция двух детонационных волн, сближающихся друг с другом со временем. Эти волны сталкиваются и проходят друг через друга в области расположения воображаемой стенки. Прошедшие волны аналогичны волне, отраженной от стенки, движутся в сгоревшей газовой смеси и ослабевают, как показано на рис. 6. На рис. 6 видно, что давление на стенке значительно больше давления падающей волны.

На рис. 7 приведена зависимость максимального давления на стенке от времени. Максимальное давление при столкновении детонационных волн с жесткой стенкой приблизительно равно $8,2 \cdot 10^6$ Па и более чем в три раза превышает максимальное давление в детонационной волне. В этом случае использование многокомпонентных облаков частиц может быть эффективным.

Заключение. В работе исследовано влияние на затухание детонационной волны инертного многокомпонентного облака частиц и проведено сравнение со случаем использования однокомпонентного облака. В качестве горючего использовалась кислородно-водородная стехиометрическая газовая смесь. Полученные результаты показывают, что при использовании подходящего распределения частиц различных размеров и материалов различной плотности в многокомпонентном облаке усиливается затухание и существенно уменьшаются размеры области, необходимой для подавления детонационной волны, по сравнению со случаем использования однокомпонентного облака частиц. Показано также, что использование нейтральных газов на выходе не оказывает существенного влияния на затухание детонационной волны. Проведено численное исследование воздействия детонационной волны на жесткую стенку и отражения от нее. Повышение давления детонационного

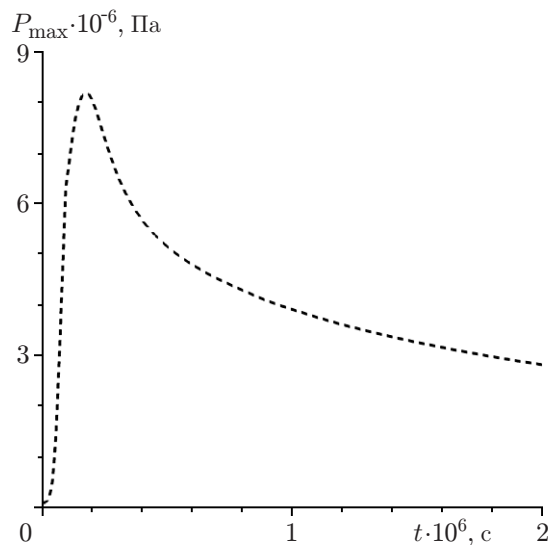


Рис. 7. Зависимость максимального давления на стенке от времени

удара моделируется путем расчета лобового столкновения двух аналогичных сближающихся детонационных волн. Показано, что воздействие детонационной волны на жесткую стенку способно существенно увеличить давление, в результате чего оно более чем в три раза превышает давление падающей волны. Установлено, что при использовании подходящего многокомпонентного облака частиц область подавления детонационной волны может уменьшаться на 58 % по сравнению со случаем использования чистого воздуха и на 25 % по сравнению со случаем использования однокомпонентного облака частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Li J., Fan W., Qiu H.** Preliminary study of a pulse normal detonation wave engine // *Aerospace Sci. Technol.* 2010. V. 14. P. 161–167.
2. **Gavrilenko T. P., Grigoriev V. V., Zhdan S. A., et al.** Acceleration of solid particles by gaseous detonation products // *Combust. Flame.* 1986. V. 66. P. 121–128.
3. **Fedorov A. V., Fomin V. M.** Detonation of the gas mixtures with inert solid particles // *IUTAM symp. on combustion in supersonic flows* / Ed. by M. Champion, B. Deshaies. Dordrecht: Springer, 1997. P. 187–191. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://doi.org/10.1007/978-94-011-5432-1_15.
4. **Carvel R. O., Thomas G. O., Brown C. J.** Some observations of detonation propagation through a gas containing dust particles in suspension // *Shock Waves.* 2003. V. 13. P. 83–89.
5. **Kosinsky P.** Numerical investigation of explosion suppression by inert particles in straight ducts // *J. Hazardous Materials.* 2008. V. 154. P. 981–991.
6. **Fomin P. A., Chen J. R.** Effect of chemically inert particles on parameters and suppression of detonation in gases // *Combust. Explosion Shock Waves.* 2009. V. 45. P. 303–313.
7. **Gottiparthi K. C., Menon S.** A study of interaction of clouds of inert particles with detonation in gases // *Combust. Sci. Technol.* 2012. V. 184. P. 406–433.
8. **Tahsini A. M.** Detonation wave attenuation in dust-free and dusty air // *J. Loss Prevent. Process Industries.* 2016. V. 39. P. 24–29.
9. **Fomin P. A., Fedorov A. V., Chen J. R.** Parameters for attenuation and suppression of detonation wave with inert particles // *Chem. Engng Trans.* 2013. V. 31. P. 847–852.

10. **Stahl G., Warnatz J.** Numerical investigation of time-dependent properties and extinction of strained methane- and propane-air flamelets // *Combust. Flame*. 1991. V. 85. P. 285–299.
11. **Liou M. S.** A sequel to AUSM: AUSM⁺ // *J. Comput. Phys.* 1996. V. 129. P. 364–382.
12. **Saurel R., Daniel E., Loraud J. C.** Two-phase flows: second-order schemes and boundary conditions // *AIAA J.* 1994. V. 32. P. 1214–1221.
13. **Tahsini A. M., Tadayon Mousavi S.** Investigating the supersonic combustion efficiency for the jet-in-cross-flow // *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2015. V. 40, N 7. P. 3091–3097.
14. **Tahsini A. M.** Heat release effects on drag reduction in high speed flows // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2013. V. 57, N 2. P. 657–661.
15. **Morris C.** Numerical modeling of single-pulse gasdynamics and performance of pulse detonation rocket engines // *Propuls. Power*. 2005. V. 21, N 3. P. 527–538.

*Поступила в редакцию 16/IX 2019 г.,
после доработки — 16/IX 2019 г.
Принята к публикации 30/IX 2019 г.*
