

03

## **Фокусировка ударной волны при взаимодействии ударной волны с цилиндрическим облаком пыли**

© П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин, О.Г. Сутырин

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

E-mail: [sutyurin@imec.msu.ru](mailto:sutyurin@imec.msu.ru)

Поступило в Редакцию 14 апреля 2016 г.

На основе уравнений Эйлера численно моделируется распространение плоской сильной ударной волны по воздуху, содержащему цилиндрическое облако кварцевой пыли малой концентрации. Используется односкоростная и одно-температурная модель пылегазовой смеси. Описано преломление падающей волны, а также формирование и фокусировка поперечных ударных волн. Обнаружены два качественно различных режима взаимодействия — внешний и внутренний, реализующиеся при различных значениях концентрации пыли. Определена зависимость положения пиковой точки фокусировки и относительной интенсивности фокусировки волн от объемной концентрации пыли в облаке в диапазоне от 0.01 до 0.15%. При повышении концентрации пыли точка фокусировки приближается к границе и смещается внутрь облака, а интенсивность фокусировки существенно возрастает.

Распространение ударных волн по запыленному газу имеет место в широком круге задач, важными примерами которых являются взрыво-безопасность угольных шахт и импульсно-взрывные методы нанесения порошковых покрытий. Ключевую роль играет взаимодействие ударных волн с локальными облаками взвешенных частиц. Экспериментальные данные показывают, что при таком взаимодействии формируется отраженная ударная волна, облако частиц существенно деформируется и неравномерно ускоряется [1]. Формируются неоднородные потоки и струи частиц, при этом существенную роль играет начальная форма облака [2]. Участки ударной волны, огибающие облако частиц снаружи, обгоняют волну внутри последнего, что приводит к формированию и отражению поперечных ударных волн [3]. Данный эффект „фокусировки“ падающей волны в случае горючих пылевых частиц может привести к инициированию горения и детонации [4]. Настоящая работа

посвящена детальному исследованию процесса фокусировки падающей волны, а также влиянию концентрации частиц в облаке на качественные характеристики течения.

Для описания двумерных нестационарных течений пылегазовой смеси используется модель, построенная на основе уравнений Эйлера для двухкомпонентной смеси совершенных газов. Применяется равновесное приближение пылегазовой смеси: пылевые частицы имеют ту же скорость и температуру, что и окружающий газ. В случае двумерных плоских течений уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho^g \\ \rho^d \\ \rho u \\ \rho v \\ H-p \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} \rho^g u \\ \rho^d u \\ p + \rho u^2 \\ \rho u v \\ H u \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{pmatrix} \rho^g v \\ \rho^d v \\ \rho u v \\ p + \rho v^2 \\ H v \end{pmatrix} = 0,$$

где  $\rho^g$ ,  $\rho^d$  и  $\rho = \rho^g + \rho^d$  суть плотности фонового газа, пылевого „газа“ и плотность смеси соответственно,  $u$  и  $v$  — компоненты скорости газа вдоль декартовых осей  $x$  и  $y$  соответственно, а  $p$  и  $H$  — полное давление и энтальпия смеси:

$$p = \frac{\rho^g}{\mu^g} R_0 T + \frac{\rho^d}{\mu^d} R_0 T, \quad H = \frac{\rho(u^2 + v^2)}{2} + \rho^g c_p^g T + \rho^d c_p^d T.$$

Здесь  $\mu^g$ ,  $\mu^d$ ,  $c_p^g$ ,  $c_p^d$  — молярные массы и удельные теплоемкости фонового и пылевого газов,  $R_0$  — универсальная газовая постоянная и  $T$  — температура смеси.

Для численного моделирования применяется явный конечно-разностный метод „предиктор-корректор“ Р.В. Маккормака [5], на гладких решениях обеспечивающий второй порядок точности по времени и пространству. Для подавления нефизических осцилляций, формирующихся вблизи фронтов разрывов, применяется искусственная вязкость Дэвиса [6].

В качестве фонового газа используется воздух ( $\mu^g = 28.98$  g/mol,  $c_p^g = 1.006$  kJ/kg · K) при  $T = 293$  K,  $p = 101\,325$  Pa. Плотность пылевого облака задается объемной долей пылевой компоненты  $\eta^d$ , моделируемой газом с высокой молярной массой, подобранной так, чтобы плотность чистого пылевого „газа“ ( $\eta^d = 100\%$ ) при тех же  $T$ ,  $p$  была равна плотности кристаллического кварца ( $\text{SiO}_2$ ,  $2.65$  g/cm<sup>3</sup>):

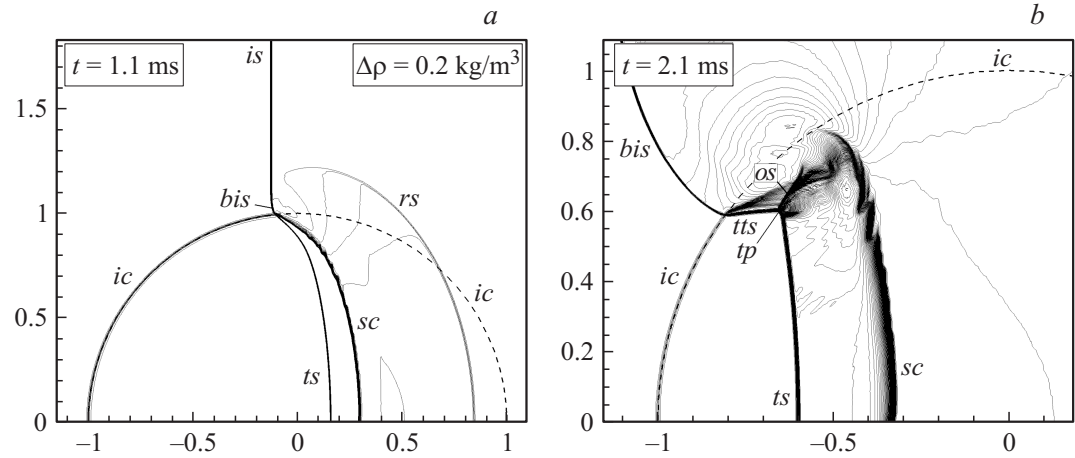
$\mu^d = 63.7 \text{ kg/mol}$ . Удельная теплоемкость пылевой компоненты принимается равной теплоемкости кварца:  $c_p^d = 0.74 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ .

Для верификации принятого подхода было воспроизведено моделирование взаимодействия ударной волны с прямоугольным облаком частиц оргстекла (плотность материала  $1.2 \text{ g/cm}^3$ , концентрация частиц  $\eta^d = 1\%$ ) [3]. В работе [3] применялась развитая континуально-дискретная неравновесная модель пылевого облака, позволяющая хорошо описывать как преломление ударной волны, так и движение ударно-ускоренных частиц пыли. Несмотря на простоту принятой в настоящей работе равновесной модели запыленного газа, расчеты показали хорошее совпадение в отношении описания преломления падающей ударной волны и формирования вторичных ударных волн. Целью настоящего исследования является описание преломления и фокусировки ударной волны при взаимодействии с облаком пыли небольшой концентрации ( $\eta^d \leq 0.15\%$ ), поэтому можно ожидать, что принятая равновесная модель обладает достаточной точностью.

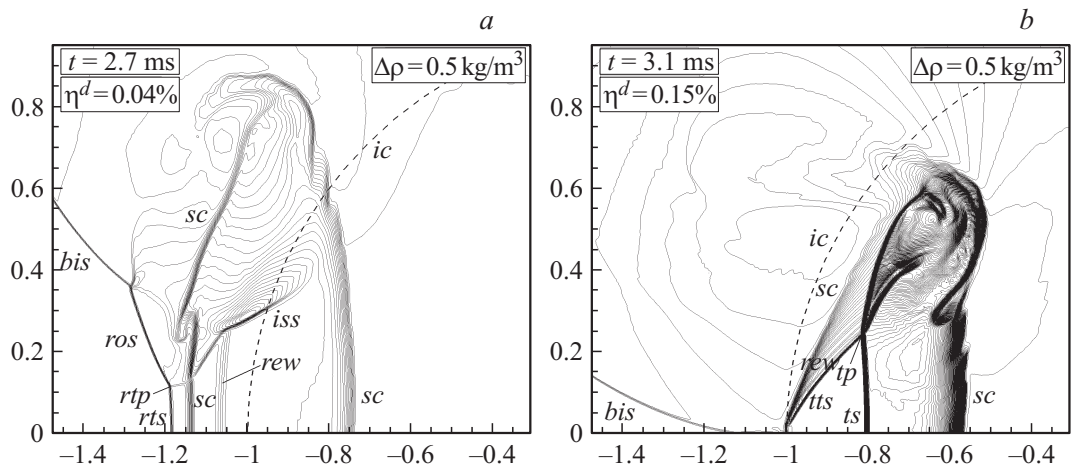
Плоская ударная волна (скачок уплотнения) распространяется справа налево по однородному воздуху, содержащему цилиндрическое облако пыли круглого поперечного сечения. Интенсивность падающей волны задается числом Маха  $M$ , радиус облака составляет  $1 \text{ m}$ , в начальный момент времени  $t = 0$  ударная волна касается правого края облака. Расчет проводится на равномерной квадратной сетке с шагом в  $750$  ячеек на метр. Задача симметрична относительно горизонтальной оси, поэтому на всех рисунках ниже приводится только верхняя половина соответствующего участка расчетной области.

На рис. 1 приведены изолинии плотности для начальной и средней стадии взаимодействия при  $\eta^d = 0.05\%$ . Пунктирной линией обозначено исходное положение границы пылевого облака. При входе волны в облако от его границы отражается выпуклый скачок уплотнения  $rs$ . Участок  $ts$  волны внутри облака распространяется существенно медленнее, чем невозмущенная волна  $is$ , и имеет вогнутую форму. С течением времени он „опрокидывается“: формируются движущийся к плоскости симметрии поперечный скачок  $tts$ , вторичный скачок  $os$  и тройная точка  $tp$ , также движущаяся к плоскости симметрии. Изогнутый участок  $bis$  падающей волны, регулярным образом сопряженный со скачком  $tts$ , огибает облако снаружи.

В зависимости от определяющих параметров задачи взаимодействие ударной волны с облаком пыли носит качественно различный характер. В диапазоне параметров  $M = 3$ ,  $\eta^d = 0.01\text{--}0.15\%$ , для которого



**Рис. 1.** Взаимодействие ударной волны (скачка уплотнения) с облаком пыли при  $M = 3$ ,  $\eta^d = 0.05\%$ : *a* — ранняя ( $t = 1.1$  ms) и *b* — средняя ( $t = 2.1$  ms) стадии, изолинии плотности с шагом  $0.2 \text{ kg/m}^3$ . *is* — падающая ударная волна, *ic* — исходная граница облака (пунктирная линия), *sc* — деформированная граница облака, *rs* — отраженный скачок, *ts* — скачок внутри облака, *bis* — изогнутый участок падающего скачка, *tts* — поперечный скачок, *tp* — тройная точка, *os* — вторичный скачок.



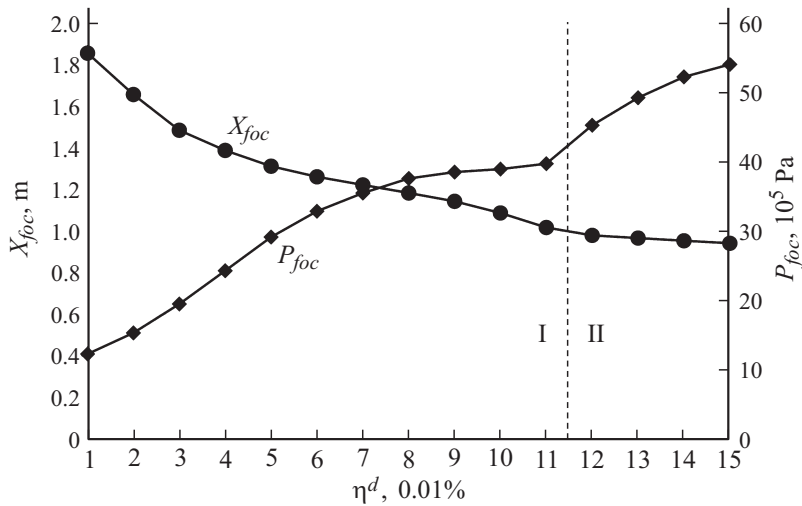
**Рис. 2.** Различные режимы взаимодействия при  $M = 3$ , изолинии плотности с шагом  $0.5 \text{ kg/m}^3$ . *a* — внешний режим ( $\eta^d = 0.04\%$ ), *b* — внутренний режим ( $\eta^d = 0.15\%$ ). *rts*, *ros* и *rtp* — вышедшие в невозмущенный газ вне облака скачок *ts*, вторичный скачок *os* и тройная точка *tp* соответственно, *iss* — внутренний вторичный скачок, *rew* — отраженная волна разрежения.

проводились расчеты, реализуются два режима взаимодействия. При небольшой концентрации пыли скачок  $ts$  и тройная точка  $tp$ , распространяющиеся внутри облака, достигают противоположной границы и выходят из облака до того, как огибающий его снаружи скачок  $bis$  достигает плоскости симметрии (рис. 2, *a*). В дальнейшем ретранслированная тройная точка  $rtп$  продолжает движение к оси симметрии. При прохождении скачка  $ts$  через границу облака, внутрь последнего отражается волна разрежения  $rew$ .

При большем значении объемной концентрации волна внутри облака распространяется еще медленнее, и скачок  $bis$  успевает достичь плоскости симметрии до того, как волны внутри облака дойдут до его противоположной границы (рис. 2, *b*). В результате в момент касания скачком  $bis$  плоскости симметрии внутри облака формируется локальная область невозмущенной пылегазовой смеси, ограниченная скачками  $ts$  и  $tts$ , которая затем коллапсирует за счет встречного движения скачков. Качественно аналогичные режимы преломления ударной волны наблюдаются при взаимодействии ударной волны со сплюснутой цилиндрической областью газа высокой плотности [7].

Процесс отражения поперечных волн от плоскости симметрии — фокусировка — также имеет существенно различную природу в зависимости от концентрации пыли в облаке. При небольшой концентрации пыли пиковое давление газа достигается в окрестности тройной точки в момент прихода последней на плоскость симметрии снаружи деформированного облака — имеет место внешний режим фокусировки (момент времени незадолго до фокусировки снаружи облака показан на рис. 2, *a*). При увеличении концентрации пыли точка фокусировки приближается к границе облака и смещается внутрь — происходит переход к внутреннему режиму фокусировки. Зависимость расстояния  $X_{foc}$  между положением пиковой точки фокусировки и центром облака от  $\eta^d$  приведена на рис. 3 (левая шкала). Переход от внешнего к внутреннему режиму фокусировки происходит при  $\eta^d = 0.11–0.12\%$ .

Давление газа  $P_{foc}$ , достигающееся в пиковой точке фокусировки, существенно зависит от  $\eta^d$  (рис. 3, правая шкала): по мере приближения точки фокусировки к границе  $P_{foc}$  монотонно увеличивается, а при переходе к внутреннему режиму фокусировки возрастает скачком. Аналогичный, но существенно ярче выраженный скачок интенсивности кумуляции наблюдается при взаимодействии ударной волны с осесимметричным пузырем газа повышенной плотности [8], причем помимо



**Рис. 3.** Зависимость расстояния  $X_{foc}$  между пиковой точкой фокусировки ударной волны и начальным положением центра облака (левая шкала) и пикового давления  $P_{foc}$  в точке фокусировки (правая шкала) от объемной концентрации  $\eta^d$  пыли в облаке. Вертикальная пунктирная линия отделяет области внешнего (область I,  $\eta^d \leq 0.11\%$ ) и внутреннего (область II,  $\eta^d \geq 0.12\%$ ) режимов фокусировки.

плотности газа важнейшую роль играет форма пузыря. Можно ожидать, что форма пылевого облака будет также оказывать существенное влияние на качественные и количественные характеристики процесса фокусировки ударной волны.

В результате проведенного моделирования показано, что взаимодействие ударной волны с облаком пыли приводит к качественной перестройке течения — формированию и фокусировке поперечных скачков уплотнения. При этом объемная концентрация пыли в облаке оказывает решающее влияние на режим фокусировки.

Работа выполнена в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова с использованием ресурсов суперкомпьютерного комплекса МГУ им. М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 14-11-00773) и Российского фонда фундаментальных исследований (№ 14-01-00891-а).

## Список литературы

- [1] *Boiko V.M., Kiselev V.P., Kiselev S.P. et al. // Shock Waves. 1997. V. 7. N 5. P. 275–285.*
- [2] *Jacobs G.B., Don W.S., Dittmann T. // Theor. Comput. Fluid Dynamics. 2012. V. 26. P. 37–50.*
- [3] *Kiselev V.P., Kiselev S.P., Vorozhtsov E.V. // Shock Waves. 2006. V. 16. N 1. P. 53–64.*
- [4] *Benkiewicz K., Koichi Hayashi A. // Fluid Dynamics Res. 2002. V. 30. P. 269–292.*
- [5] *MacCormack R.W. // AIAA Paper. 1969. N 354.*
- [6] *Davis S.F. // SIAM J. Sci. Stat. Comput. 1987. V. 8. N 1. P. 1–18.*
- [7] *Ray J., Samtaney R., Zabusky N.J. // Phys. Fluids. 2000. V. 12. N 3. P. 707–716.*
- [8] *Georgievskiy P.Yu., Levin V.A., Sutyurin O.G. // Shock Waves. 2015. V. 25. N 4. P. 357–369. 10.1007/s00193-015-0557-4.*