

УДК 532.529

Т.Р. Аманбаев*, **Г.А. Бесбаев**, **Ж.Д. Изтаев**, **Г.Е. Тилеуов**, **Н.А. Абдусалиев**

д.ф.-м.н., профессор, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан
к.ф.-м.н., ассоциированный профессор, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан
к.п.н., доцент, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан
магистр, старший преподаватель, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан
магистр, преподаватель, ЮКУ им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

*Автор для корреспонденции: tulegen_amanbaev@mail.ru

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТАЦИОНАРНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН С ТЕЛОМ ПРИ НАЛИЧИИ ПЕРЕД НИМ ОБЛАКА ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ

Аннотация

В рамках допущений механики многофазных сред исследовано взаимодействие стационарных (бесконечной длительности) ударных волн с поперечно расположенной пластиной при наличии перед ней экранирующего слоя газозвеси диспергированных частиц. Задача решалась численно методом крупных частиц. Получены характерные профили скоростей фаз в падающей ударной волне, а также расчетные "осциллограммы" давления и температур фаз в фиксированных точках передней поверхности пластины. Изучено влияние определяющих параметров на максимальное давление на пластине и интенсивность стока частиц на ее поверхность. Отмечено, что наличие пылевого слоя перед телом в зависимости от массового содержания в нем дисперсной фазы может привести как к уменьшению максимального давления, так и его увеличению. Сток частиц на поверхность пластины растет с увеличением их размера.

Ключевые слова: ударная волна, диспергированные частицы, метод крупных частиц.

Введение

Взаимодействие ударных волн (УВ) с преградой при наличии перед ней экранирующего слоя газозвеси частиц в одномерной постановке (когда преграда полностью закрывала поперечное сечение канала) исследовалось в [1-10]. Данная работа посвящена изучению особенностей взаимодействия плоских стационарных УВ бесконечной длительности с поперечно расположенной пластиной конечной высоты. Задача решалась в двумерной постановке в рамках допущений механики многофазных сред [1]. Результаты расчетов получены численным методом крупных частиц в виде "осциллограмм" давления, температур газа и частиц в фиксированных точках передней поверхности пластины, а также характерных профилей скоростей фаз в падающей УВ.

Уравнения движения и постановка задачи

Примем основные допущения механики многофазных сред [1]. Кроме того, будем полагать, что частицы сферические, монодисперсные, несжимаемые, между собой не сталкиваются, не дробятся и имеют постоянную теплоемкость. Газ считаем идеальным и калорически совершенным (эффекты вязкости и теплопроводности проявляются лишь в процессах взаимодействия газа с частицами). Задача рассматривается в двумерной плоской постановке.

В рамках принятых допущений уравнения плоского двумерного движения двухфазной газозвеси частиц имеют вид [1] (в декартовой системе координат x, y)

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial x} + \frac{\partial \rho_1 v_1}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_2 v_2}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_1 u_1 v_1}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} - n f_x, \quad \frac{\partial \rho_1 v_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1 v_1}{\partial x} + \frac{\partial \rho_1 v_1^2}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} - n f_y, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_2 u_2 v_2}{\partial y} = n f_x, \quad \frac{\partial \rho_2 v_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2 v_2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_2 v_2^2}{\partial y} = n f_y, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_2 e_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2 e_2}{\partial x} + \frac{\partial \rho_2 v_2 e_2}{\partial y} = n q,$$

$$\frac{\partial (\rho_1 E_1 + \rho_2 E_2)}{\partial t} + \text{div}(\rho_1 \mathbf{v}_1 E_1 + \rho_2 E_2 \mathbf{v}_2 + \alpha_1 \mathbf{v}_1 p + \alpha_2 \mathbf{v}_2 p) = 0$$

$$p = \rho_i^\circ R_i T_i, \quad E_i = e_i + \mathbf{v}_i^2 / 2, \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad i=1, 2. \quad (4)$$

Здесь нижние индексы 1, 2 соответствуют параметрам несущей и дисперсной фаз, $\rho_i, \rho^0, v_i, e_i, E_i, T_i, \alpha_i, c_i$ - приведенные и истинные (отмечены верхним индексом “о”) плотности, векторы скоростей (u_i, v_i — их компоненты по осям x и y), внутренние и полные энергии, а также температуры, объемные доли и теплоемкости газа и частиц; p, R_i - давление газа и газовая постоянная; n, d - число частиц в единице объема смеси и их диаметр; f, q - сила аэродинамического взаимодействия газа и частицы (f_x, f_y - ее составляющие по осям x и y) и интенсивность их теплообмена. Уравнения (1) это уравнения сохранения масс фаз, (2) - уравнения сохранения импульсов, (3) - уравнения притока тепла к дисперсной фазе и сохранения полной энергии всей смеси в целом. Законы межфазных силового и теплового взаимодействий зададим в форме [1].

Рассмотрим взаимодействие плоской стационарной (бесконечной длительности) УВ с пластиной высотой h и шириной s . Пусть в начальный момент времени диспергированные частицы в виде покоящегося облака газозвеса занимают прямоугольную область перед пластиной с размерами h (высота) и b (ширина). Параметры газа за фронтом УВ удовлетворяют соотношениям Ренкина-Гюгонио. Течение будем исследовать, начиная с момента контакта фронта УВ с левой границей пылевого слоя. Таким образом имеем следующие начальные условия (с учетом симметрии течения относительно оси x):

$$u_1 = u_{1f}, \quad v_1 = 0, \quad \rho_1^\circ = \rho_{1f}^\circ$$

$$p = p_f \quad (-\infty < x < 0, 0 \leq y < \infty)$$

$$v_1 = 0, \quad \rho_1^\circ = \rho_{10}^\circ, \quad p = p_0$$

$$(0 \leq x < b, \quad 0 \leq y < \infty),$$

$$(b \leq x < b + s, \quad h < y < \infty),$$

$$(b + s \leq x < \infty, \quad 0 \leq y < \infty),$$

$$\rho_{1f}^\circ / \rho_{10}^\circ = (\gamma + 1) M^2 / [2 + (\gamma - 1) M^2],$$

$$\frac{u_{1f}}{a_{10}} = \frac{2}{\gamma + 1} \left(M - \frac{1}{M} \right), \quad \frac{p_f}{p_0} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M^2 - 1).$$

Здесь дополнительные нижние индексы 0 и f соответствуют параметрам газа перед и за фронтом УВ; γ - показатель адиабаты газа; M - число Маха фронта волны.

Распределение параметров частиц в пылевом слое при $t=0$ предполагалось однородным

$$v_2 = 0, \quad \rho_2 = \rho_{20}, \quad T_2 = T_{20}$$

$$(0 \leq x < b, \quad 0 \leq y \leq h).$$

Расчетная область имела вид прямоугольника. Его левая граница выбиралась таким образом, чтобы возмущения газа, вызываемые пластиной за расчетное время, ее не достигали. Правая граница была подвижной для того, чтобы фронт УВ за время расчета не покидал пределы расчетной области. В качестве граничных условий на поверхности пластины для газа принято условие непротекания, а для частиц - условие свободного стока, моделирующее их выпадение на поверхность при абсолютно неупругом соударении. На нижней границе (вдоль оси x) примем условие симметрии, на левой границе - условие набегающего потока, а на остальных границах - условие непрерывности течения.

Обсуждение некоторых результатов

Уравнения движения газовой взвеси (1)-(4) с замыкающими соотношениями, начальными и граничными условиями численно интегрировались методом крупных частиц [5, 11]. Точность расчетов контролировалась повторными пересчетами с уменьшенными вдвое шагами по времени и координатам. Оптимальный шаг счета устанавливался критериями устойчивости и необходимой точностью расчета процессов межфазного взаимодействия. При этом в качестве характерной длины задачи использовалась минимальная характерная длина

$$L_* = \min \{L_v, L_T, h, b\}$$

Расчеты проводились до формирования стационарной картины течения, соответствующей обтеканию пластины набегающим потоком газа за скачком. При этом параметры газа в точке торможения на передней поверхности пластины сравнивались со значениями, следующими из интеграла Бернулли. Кроме того, параметры газа на оси симметрии и перед фронтом, отошедшей от пластины УВ, сопоставлялись с соотношениями Ренкина - Гюгониона ударном скачке. Сравнение показало хорошее согласие расчетных данных с аналитическими формулами во всех диапазонах изменения определяющих параметров: отличие составляло не более 5%.

Расчеты проводились для воздуха и графитовых частиц. При этом считалось, что в начальный момент времени дисперсная и несущая фазы находятся в термодинамическом равновесии при нормальных условиях. Высота и толщина пластины соответственно равны 0.17 и 0.08 м, а высота и ширина пылевого слоя со взвешенными частицами - 0.17 и 0.45 м. Исследовалось влияние относительного массового содержания частиц в слое газовой взвеси $m_2 = \rho_{20} / \rho_{10}$ и их диаметра d на динамику взаимодействия УВ с телом при фиксированном числе Маха волны $M = 4.2$. Ниже приведены некоторые результаты расчетов.

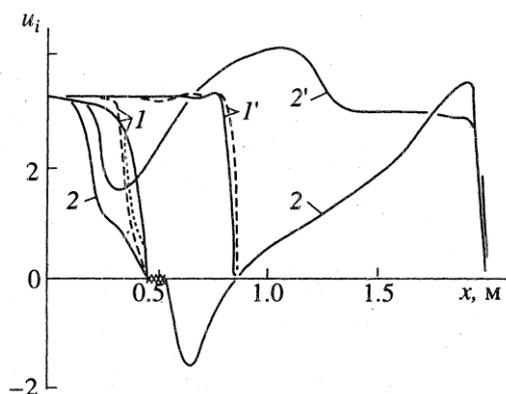


Рис. 1. Распределение скоростей фаз

На рис. 1 показаны эпюры продольных скоростей газа (сплошные линии) и частиц (пунктирные) в различные моменты времени при $M = 4.2$, $m_2 = 1$ и $d = 60$ мкм. Кривые 1, 2 - эпюры вдоль осисимметрии $y=0$ в моменты времени $t=0.6$ и 1.6 мс, а кривые 1', 2' - эпюры в те же моменты времени вдоль линии $y = 2h$. Штриховые кривые отвечают отсутствию частиц перед пластиной.

Поток газа за фронтом УВ, встречаясь пылевым слоем, часть импульса и тепла отдает частицам и постепенно тормозится. В процессе взаимодействия УВ с пластиной образуются отраженная волна и сильное поперечное течение газа вдоль пластины. При этом перед пластиной происходит сложное нестационарное взаимодействие отраженной волны уплотнения с набегающим двухфазным потоком газозвеси. Попадая за фронт УВ, частицы вовлекаются в движение потоком газа и приобретают значительную скорость. Затем, попадая в зону отраженной волны, они тормозятся и часть их, увлекаясь поперечным течением газа, уносится в сторону от передней поверхности пластины. Поэтому не все частицы, находящиеся вначале перед телом, попадают на его поверхность (этот эффект подробно анализируется ниже). При этом ширина зоны со взвешенными частицами существенно сокращается. Например, к моменту времени 0.6 мс она сократилась почти в 5 раз, а к моменту 1.6 мс частиц перед пластиной почти не оказывается. С течением времени отраженная УВ переходит в отошедшую волну перед пластиной, а процесс взаимодействия набегающей УВ с пластиной (в целом) - в установившееся поперечное обтекание. За пластиной образуется зона вихревого течения газа, ширина которой (вдоль оси x) примерно в 2 раза больше высоты пластины. Попадания частиц в эту зону в расчетах не наблюдалось.

Безразмерный параметр, характеризующий интенсивность стока частиц на переднюю поверхность пластины, определялся как масса всех частиц, выпавших на поверхность к текущему моменту времени, отнесенная к их первоначальной суммарной массе перед пластиной

$$\bar{G}(t) = \left(\int_0^t \int_0^h \rho_2 u_2 dy dt \right) / \rho_{20} hb, \quad 0 \leq \bar{G}(t) \leq 1.$$

Отметим, что $G(t)$ - монотонно возрастающая функция и она показывает долю (от первоначальной массы) частиц, попавших на поверхность пластины к текущему моменту времени.

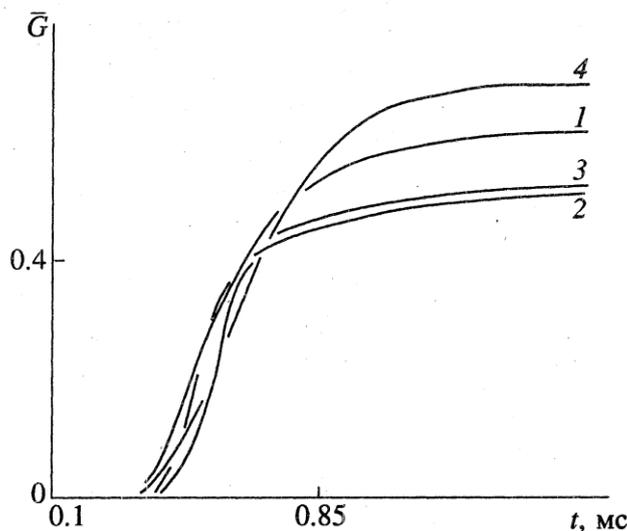


Рис. 2. Зависимость интенсивности стока частиц на поверхность пластины от времени

Характерный вид зависимости $G(t)$ приведен на рис. 2, на котором кривые 1, 2 и 3 соответствуют различным массовым содержаниям частиц $m_2=1; 2$ и 3 при их диаметре $d=60$ мкм, а кривая 4 – диаметру частиц $d = 120$ мкм при $m_2=1$ (число Маха то же, что на рис. 1). Видно, что во всех рассматриваемых случаях уже к моменту времени $t=1.3$ мс сток G приближается к своему предельному значению. Причем увеличение размера частиц приводит к росту предельного стока, а увеличение их массового содержания приводит, наоборот, к его уменьшению. При увеличении размера частиц растет их инерционность и уменьшается интенсивность силового взаимодействия с газом. В связи с этим более крупные частицы, ускоренные в падающей УВ при подлете к пластине, тормозятся медленнее, а их траектории искривляются слабее, что приводит к росту стока дисперсной фазы к поверхности тела. Увеличение концентрации частиц в пылевом слое приводит к интенсификации межфазного силового взаимодействия. При этом растет доля частиц, уносящихся в сторону от передней поверхности пластины поперечным потоком газа. Следует отметить, что увеличение m_2 от единицы до двух приводит к заметному уменьшению предельного стока частиц, в то время как дальнейший рост m_2 от двух до трех на него почти не влияет.

За фронтом УВ между несущей и дисперсной фазами происходит обмен не только импульсом, но и теплом. В связи с этим важно изучить изменение температур фаз в расчетной области. Отмечено, что некоторое количество тепловой энергии ударно-нагретого газа переходит к относительно холодным частицам. В результате по мере продвижения к поверхности пластины дисперсные частицы постепенно нагреваются. Процесс нагрева частиц еще более усиливается тогда, когда они попадают в зону отраженной от поверхности тела УВ. При массовом содержании взвешенной фазы $m_2 \leq 1$ влияние частиц на температуру газа на поверхности пластины проявляется достаточно слабо. Существенное уменьшение температуры газа на пластине по сравнению со случаем отсутствия частиц имеют место при $m_2 \geq 3$. При этом в релаксационной зоне за фронтом УВ частицы успевают отобрать у несущей фазы значительное количество тепла и попадают на поверхность сильно нагретыми.

Таким образом, на основе уравнений механики многофазных сред и использованием численного метода крупных частиц исследовано взаимодействие стационарных ударных волн с пластиной при наличии перед ней облака диспергированных частиц. Установлены характеристики поведения дисперсной фазы в потоке газа за ударной волной. Изучено влияние определяющих параметров задачи на течение двухфазной среды в окрестности

передней поверхности пластины, а также в области за пластиной.

Список литературы

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. 465 с.
2. Ивандаев А.И., Кутушев А.Г. Влияние экранирующих слоев газозвеси на отражение ударных волн // Прикладная механика и техническая физика. 1985. № 1. С. 115-120.
3. Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В., Турыгина И.А. Численное моделирование взаимодействия ударных волн с проницаемыми деформируемыми многослойными пакетами плетеных сеток. Проблемы прочности и пластичности, 2016. Т. 78. № 1. С. 81-91.
4. Глазова Е.Г., Кочетков А.В. Численное моделирование взаимодействия деформируемых газопроницаемых пакетов сеток с ударными волнами // ПМТФ, 2012. №3. С.11-19.
5. Губайдуллин А.А., Ивандаев А.И., Нигматулин Р.И. Модифицированный метод “крупных частиц” для расчета нестационарных волновых процессов в многофазных дисперсных средах // Журн. вычис. матем. и матем. физ. 1977. Т. 17. № 6. С. 1531-1544.
6. Marconi F., Rudman S., Calia V. Numerical study of one-dimensional unsteady particle-laden flows with shocks // AIAA J. 1981.V. 19. No 10, pp. 1294–1301. <https://doi.org/10.2514/3.60063>
7. Miura H., Saito T., Glass I. Shock-Wave Reflection from a Rigid Wall in a Dusty Gas // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1986. Vol. 404, No. 1826, pp. 55-67.
8. Ивандаев А.И. Течение в ударной трубе при наличии взвешенных частиц // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20. № 3. С. 105-111.
9. Булович С.В., Масюкевич А.В. экспериментальное исследование взаимодействия ударной волны со слоем проницаемого материала // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 4. С. 135-144. DOI: 10.18721/JPM.12413
10. Беляев П.Е., Клиначева Н.Л. Влияние экранирующего слоя газозвеси на силовое воздействие ударной волны на жёсткую стенку // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: математика. Механика. Физика. 2016. Т. 8. № 4. С. 49-55. DOI: 10.14529/mmph160406
11. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982.

References

1. Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznyh sred. M.: Nauka, 1987. 465 s.
2. Ivandaev A.I., Kutushev A.G. Vliyanie jekranirujushhh sloev gazovzvesi na otrazhenie udarnyh voln // Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika. 1985. № 1. S. 115-120.
3. Glazova E.G., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Turygina I.A. Chislennoe modelirovanie vzaimodejstvija udarnyh voln s pronicaemymi deformiruemyimi mnogoslojnymi paketami pletenyh setok. Problemy prochnosti i plastichnosti, 2016. T. 78. № 1. S. 81-91.
4. Glazova E.G., Kochetkov A.V. Chislennoe modelirovanie vzaimodejstvija deformiruemyh gazopronicaemyh paketov setok s udarnymi volnami // PMTF, 2012. №3. S.11-19.
5. Gubajdullin A.A., Ivandaev A.I., Nigmatulin R.I. Modificirovannyj metod “krupnyh chastic” dlja rascheta nestacionarnyh volnovyh processov v mnogofaznyh dispersnyh sredah // Zhurn. vychis. matem. i matem. fiz. 1977. T. 17. № 6. S. 1531-1544.
6. Marconi F., Rudman S., Calia V. Numerical study of one-dimensional unsteady particle-laden flows with shocks // AIAA J. 1981.V. 19. No 10, pp. 1294–1301. <https://doi.org/10.2514/3.60063>
7. Miura H., Saito T., Glass I. Shock-Wave Reflection from a Rigid Wall in a Dusty Gas // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1986. Vol. 404, No. 1826, pp. 55-67.
8. Ivandaev A.I. Tечenie v udarnoj trube pri nalichii vzveshennyh chastic // Fizika gorenija i

vzryva. 1984. T. 20. № 3. S. 105-111.

9. Bulovich S.V., Masjukevich A.V. jeksperimental'noe issledovanie vzaimodejstviya udarnoj volny so sloem pronicaemogo materiala // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki. 2019. T. 12. № 4. S. 135-144. DOI: 10.18721/JPM.12413

10. Beljaev P.E., Klinacheva N.L. Vlijanie jekranirujushhego sloja gazovzvesi na silovoe vozdejstvie udarnoj volny na zhjostkuju stenku // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: matematika. Mehanika. Fizika. 2016. T. 8. № 4. S. 49-55. DOI: 10.14529/mmph160406

11. Belocerkovskij O.M., Davydov Ju.M. Metod krupnyh chastic v gazovoj dinamike. M.: Nauka, 1982.

Т.Р. Аманбаев*, Г.А. Бесбаев, Ж.Д. Изтаев, Г.Е. Тилеуов, Н.А. Абдусалиев

ф.-м.ғ.д., профессор, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан
ф.-м.ғ.к., қауымдастырылған профессор, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан
п.ғ.к., қауымдастырылған профессор, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан
магистр, аға оқытушы, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан
магистр, оқытушы, М. Әуезов атындағы ОҚУ, Шымкент, Қазақстан

*Корреспондент авторы: tulegen_amanbaev@mail.ru

АЛДЫҒЫ ЖАҒЫНДА ШАШЫЛҒАН БӨЛШЕКТЕР БҰЛТЫ БОЛҒАНДА СТАНЦИОНДЫ СОҚҚЫ ТОЛҚЫНДАРЫНЫҢ ДЕНЕМЕН ӨЗАРА ӘСЕРЛЕСУ

Түйін

Көп фазалы орталар механикасының болжамдары шеңберінде стационарлық (шексіз ұзақтығы) соққы толқындарының көлденең орналасқан пластинамен өзара әрекеттесуі зерттелді, оның алдында дисперсті бөлшектердің газ суспензиясының экрандаушы қабаты болған кезде. Мәселе үлкен бөлшектердің әдісімен сандық түрде шешілді. Соққы толқынындағы фазалық жылдамдықтардың сипаттамалық профилдері, сондай-ақ пластинаның алдыңғы бетінің бекітілген нүктелеріндегі фазалық қысым мен температураның есептелген "осциллограммалары" алынды. Анықтаушы параметрлердің пластинадағы максималды қысымға және оның бетіне бөлшектер ағынының қарқындылығына әсері зерттелді. Дененің алдында шаң қабатының болуы оның дисперсті фазасының массалық құрамына байланысты максималды қысымның төмендеуіне де, Оның жоғарылауына да әкелуі мүмкін екендігі атап өтілді. Пластинаның бетіне бөлшектердің ағуы олардың мөлшерінің ұлғаюымен өседі.

Кілттік сөздер: соққы толқыны, дисперсті бөлшектер, ірі бөлшектер әдісі.

T.R. Amanbaev*, G.A. Besbaev, Zh.D. Iztaev, G.E. Tileuov, N.A. Abdusaliev

Dr.Phys.-Math.Sci., Professor, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan
Cand. Phys.-Math.Sci., Associate Professor, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan
Cand.Ped.Sci., Associate Professor, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan
master, senior lecturer, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan
master, lecturer, M. Auezov SKU, Shymkent, Kazakhstan

*Corresponding author's email: tulegen_amanbaev@mail.ru

INTERACTION OF STATIONARY SHOCK WAVES WITH A BODY IN THE PRESENCE OF A CLOUD OF DISPERSED PARTICLES IN FRONT OF IT

Abstract

Within the assumptions of the mechanics of multiphase media, the interaction of stationary (infinite duration) shock waves with a transversely positioned plate in the presence of a shielding layer of gas suspension of dispersed particles in front of it is studied. The problem was solved numerically using the large particle method. Characteristic profiles of phase velocities in an incident shock wave are obtained, as well as

calculated "oscillograms" of pressure and phase temperatures at fixed points on the front surface of the plate. The influence of the determining parameters on the maximum pressure on the plate and the intensity of particle runoff on its surface has been studied. It is noted that the presence of a dust layer in front of the body, depending on the mass content of the dispersed phase in it, can lead to both a decrease in maximum pressure and an increase in it. The outflow of particles to the plate surface increases with an increase in their size.

Keywords: shock wave, dispersed particles, coarse particle method.