

УДК 532.529

ОТРАЖЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН ОТ ЖЕСТКОЙ ГРАНИЦЫ В СМЕСИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

2. НЕРАВНОВЕСНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ

А. А. Жилин, А. В. Федоров

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

В рамках механики гетерогенных сред численно исследован процесс отражения ударных волн (УВ) от жесткой стенки в двухкомпонентной смеси конденсированных материалов с учетом различия скоростей и давлений компонентов. Показано, что УВ дисперсионного типа с монотонными профилями скорости может отразиться УВ аналогичного типа с монотонными/немонотонными профилями скорости. Дисперсионная УВ с немонотонным профилем скорости в легком компоненте и монотонным в тяжелом отражается УВ дисперсионно-замороженного типа. При отражении замороженно-дисперсионной УВ ее тип либо сохраняется, либо меняется на дисперсионно-замороженный в зависимости от начальных параметров смеси. Дисперсионно-замороженная УВ отражается УВ того же типа с небольшими изменениями в профилях скорости и давления. Отражение замороженной УВ двухфронтной конфигурации может быть УВ дисперсионно-замороженного типа или замороженной УВ двухволновой конфигурации. Показано, что в области около стенки образуется пограничный слой, в котором объемная концентрация и плотность легкого компонента имеют значения, превышающие значения за отраженной УВ.

Обсудим результаты численных расчетов начально-краевой задачи (1), (2) из [1], выполненных в неравновесном приближении и изученных в рамках равновесной модели. Как и в [1], все величины представлены в безразмерном виде.

Прежде всего приведем некоторые результаты работ [2–4] относительно возможных типов ударных волн (УВ), взаимодействующих с твердой стенкой, необходимые в дальнейшем. На рис. 1 представлена карта решений для падающих и отраженных УВ в плоскости начальной объемной концентрации m_{10} и скорости УВ $|D|$ (заметим, что равновесные скорости C_{e0} , C_{ek} и C_{er} в данной плоскости сливаются в одну линию C_e). В частности, для областей I_{11} и I_{12} характерно наличие неустойчивого течения в виде ударной волны разрежения, когда $u_0 - D < u_k - D$. В областях I_{21} и I_{31} падающая УВ имеет полностью дисперсионную структуру как с монотонно убывающими профилями скоростей компонентов, так и с немонотонным профилем скорости для легкого компонента при наличии локального минимума и монотонно убывающим для тяжелого. В областях I_{22} и I_{32} падающие УВ имеют монотонно убывающие профили скорости тяжелого компонента. Что касается

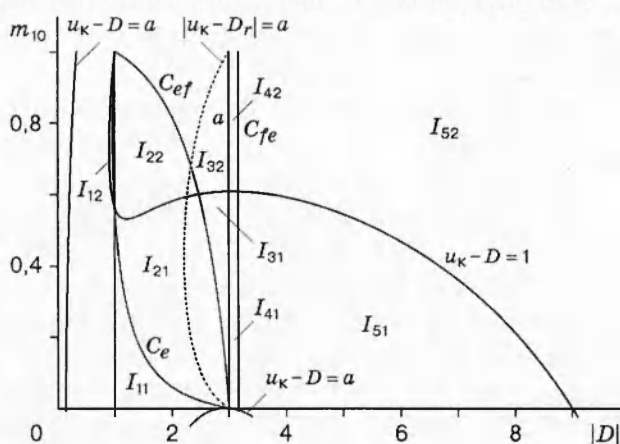


Рис. 1

дисперсионно-замороженную УВ, отраженную от жесткой стенки, ее тип либо сохраняется, либо меняется на дисперсионно-замороженный в зависимости от начальных параметров смеси. Дисперсионно-замороженная УВ отражается УВ того же типа с небольшими изменениями в профилях скорости и давления. Отражение замороженной УВ двухфронтной конфигурации может быть УВ дисперсионно-замороженного типа или замороженной УВ двухволновой конфигурации. Показано, что в области около стенки образуется пограничный слой, в котором объемная концентрация и плотность легкого компонента имеют значения, превышающие значения за отраженной УВ.

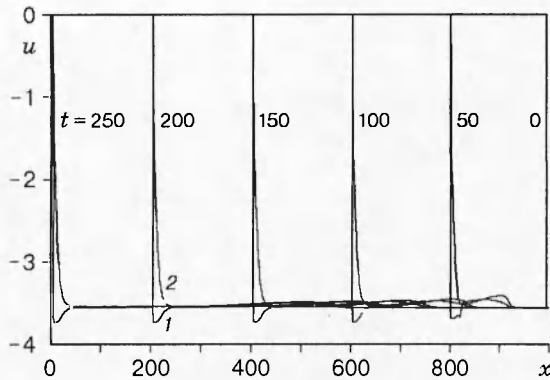


Рис. 2

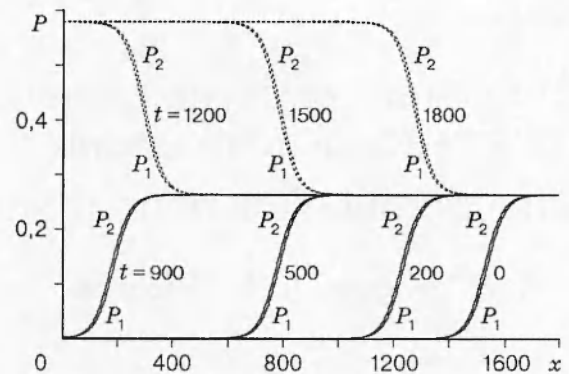


Рис. 3

легкого компонента, то для УВ с небольшой амплитудой соответствующий профиль скорости является монотонно убывающим как перед внутренним разрывом, так и за ним, а для УВ с более высокой амплитудой скорость легкого компонента за разрывом возрастает до конечного равновесного состояния. В областях I_{41} и I_{51} падающие УВ имеют головной скачок уплотнения во втором компоненте, дополненный зоной релаксации, где скорость монотонно убывает до конечного равновесного значения, и непрерывно убывающий профиль скорости в первом компоненте с изломом в месте возникновения головного разрыва. В областях I_{42} и I_{52} падающие УВ имеют двухволновую конфигурацию: головной скачок в тяжелом компоненте и внутренний разрыв в легком. С увеличением скорости УВ расстояние между головным и внутренним разрывами сокращается. Так, при $D = -4$, $m_{10} = 0,9$ головной и внутренний скачки уплотнения практически сливаются и распространяются вместе с постоянной скоростью. На рис. 2 им соответствуют кривые 2 и 1.

Для численных расчетов начально-краевой задачи (1), (2) из [1] использован модифицированный метод «крупных частиц» [5]. Конечно-разностные уравнения для определения скоростей на промежуточном слое по времени с учетом силы Архимеда, выражение для нахождения объемной концентрации тяжелого компонента на новом временном слое, условия устойчивости представлены в работе [6]; также использовалась искусственная вязкость, введенная в [7].

1. Изучим отражение УВ с начальными параметрами из областей I_{21} и I_{31} . Здесь при $D = -1,5$ и малых m_{10} (см. рис. 1) падающая УВ является полностью дисперсионной и отражается УВ аналогичного типа (параметры смеси таковы, что скорости и давления фаз мало отличаются друг от друга). При этом и параметры смеси для падающей и отраженной УВ оказались близкими, т. е. $|D| \approx |D_r|$, $P_k - P_0 \approx P_r - P_k$. При численном расчете отраженная волна формируется и устанавливается практически мгновенно. На рис. 3 приведены профили давлений фаз при $m_{10} = 0,2$, $D = -1,5$. Видно, что скорость отраженной УВ при $D_r = 1,636$ (штриховые кривые) несколько больше скорости падающей при $D = -1,5$ (сплошные кривые). Существенных различий в кривизне профилей скоростей и давлений для падающей и отраженной УВ не отмечается, лишь в областях, примыкающих к равновесным состояниям, падающая волна характеризуется более плавным примыканием (ср. кривые на рис. 3 при $t = 500$ (падающая) и $t = 1500$ (отраженная)). Конфигурация профилей давлений отраженной волны является практически «зеркальным отражением» соответствующих профилей в падающей УВ. В работе [1, таблица] показано, что избыточное давление на стенке превышает прирост давления в падающей волне: $k = (P_r - P_0)/(P_k - P_0) \approx 2$. Таким образом, при малых объемных концентрациях легкого компонента имеется аналогия с классической задачей газовой динамики об отражении

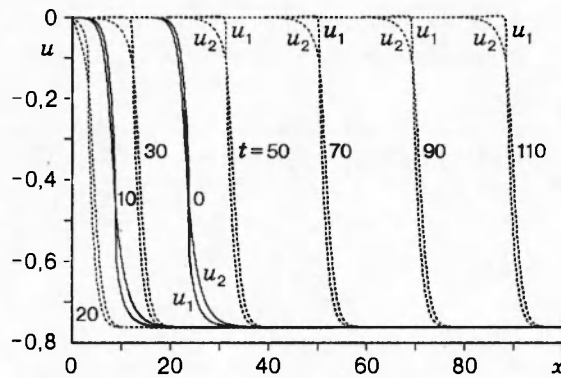


Рис. 4

ударной волны от стенки для случая совершенного газа с постоянными теплоемкостями, где для слабой падающей УВ коэффициент усиления отраженной волны k равен двум, отношение скоростей $D_r/D = -1$. Как известно, для сильных волн скорость отраженной УВ при $\gamma < 3$ меньше скорости падающей волны, а при $\gamma > 3$ больше скорости падающей УВ. В двухкомпонентной смеси аналогичный эффект увеличения и уменьшения скорости отраженной УВ относительно падающей может достигаться путем изменения начальной объемной концентрации легкого компонента (см. [1, таблица]). За фронтом падающей УВ ($m_{20} = 0,8$) объемная концентрация тяжелого компонента монотонно возрастает до $m_{2к} = 0,833$ и продолжает возрастать за фронтом отраженной волны до $m_{2r} = 0,860$. Объемная концентрация первого компонента убывает в падающей, а затем и в отраженной волне. Плотности компонентов смеси монотонно возрастают как за падающей, так и за отраженной УВ. Проведенный анализ расчетных данных по структуре профилей течений для падающей и отраженной УВ показал, что ширина отраженной волны на треть меньше, чем падающей. Это обусловлено усилением отраженной УВ [3].

Рассмотрим отражение замороженно-дисперсионной УВ. Падающая УВ имеет внутренний разрыв в параметрах течения первого компонента и слабый разрыв во втором компоненте (в области I_{22} и I_{32} на рис. 1) при $m_{10} = 0,85$. Отраженная УВ принадлежит этому же классу, но характеризуется немонотонным поведением скорости. На рис. 4 видно, что при $D = -1,5$, $m_{10} = 0,85$ скорость легкой фазы u_1 за фронтом отраженной УВ немного превышает конечное равновесное значение. Этот факт объясняется тем, что отраженная УВ D_r движется по смеси с параметрами, соответствующими новому равновесному состоянию, и на карте решений (см. рис. 1) конечное состояние в УВ смещается в сторону больших скоростей и меньших объемных концентраций. Проведенный расчет по формуле (3) (см. [1]) показал, что это состояние характеризуется приведенными начальными параметрами $u'_0 = u_k - D_r = -1,715$, $m'_{10} = m_{1к} = 0,712$ и $P'_0 = P_k = 1,426$, причем скорость отраженной УВ меньше скорости падающей (см. также [1, рис. 1]).

Увеличение m_{10} до 0,95 приводит к еще большему уменьшению скорости отраженной УВ. При этом качественное поведение профилей скорости и давления для падающей ($u_0 - D = -1,5$, $m_{10} = 0,95$) и отраженной УВ ($u_k - D_r = -1,572$, $m_{1к} = 0,896$) не различается.

Обратим еще раз внимание на поведение объемных концентраций и плотностей смеси за фронтом отраженной УВ. В таблице представлены значения объемных концентраций и плотностей компонентов смеси на жесткой стенке и в конечном равновесном состоянии за фронтом отраженной УВ в зависимости от объемной концентрации легкого компонента. Видно, что в области около стенки образуется пограничный слой, в котором объемная

Установившиеся параметры смеси на жесткой стенке
за фронтом отраженной УВ для $D = -1,5$

m_{10}	m_{2r}	m_{2r}^c	ρ_{1r}	ρ_{1r}^c	ρ_{2r}	ρ_{2r}^c
0,20	0,860	0,860	0,220	0,220	2,335	2,335
0,50	0,800	0,797	0,922	0,938	2,442	2,432
0,85	0,458	0,425	3,111	3,300	1,455	1,351
0,95	0,193	0,167	4,334	4,472	0,605	0,524

концентрация и плотность легкого компонента имеют значения, превышающие конечные за отраженной УВ, а тяжелого компонента — меньше, чем в установившемся течении за фронтом отраженной УВ.

Изучим более детально процессы, происходящие вблизи жесткой стенки при трансформации падающей УВ замороженно-дисперсионного типа в отраженную. Процесс взаимодействия указанной УВ со стенкой условно может быть разбит на три стадии. На начальной стадии происходит плавное нарастание плотности и давления компонентов смеси, увеличение объемной концентрации дискретного компонента и уменьшение объема несущего материала. Эта стадия протекает до тех пор, пока внутренняя УВ не подойдет к стенке. Далее следует стадия скачкообразного роста давлений и плотностей компонентов, связанная с контактом внутренней УВ в легком компоненте со стенкой. При этом плотность и объемная концентрация тяжелых частиц на стенке достигают локального максимума. На этой стадии давление на стенке в тяжелом компоненте больше давления в легком (например, при $m_{10} = 0,95$ на 70 %) и превышает значение конечного равновесного давления за отраженной УВ (на 45 %). Быстрое повышение давления на стенке порождает отраженную УВ, движущуюся в обратном направлении. Наконец, наступает третья стадия последующего плавного выравнивания давлений компонентов до конечного равновесного состояния за отраженной УВ, соответствующего определенному аналитически. Плотности компонентов смеси на стенке плавно нарастают, при этом плотность тяжелых частиц на стенке ρ_{2r}^c остается меньшей, чем в конечном равновесном состоянии за фронтом отраженной УВ ρ_{2r} , а плотность легкого материала на стенке ρ_{1r}^c сохраняется большей конечного установившегося значения ρ_{1r} за отраженной УВ. Поведение объемных концентраций компонентов смеси m_{2r} и m_{2r}^c в области около стенки качественно аналогично поведению плотностей (см. таблицу).

Описанное поведение параметров обусловлено тем, что при отражении от жесткой поверхности УВ происходит взаимодействие отраженных частиц тяжелой фазы с падающими тяжелыми частицами и легким связующим материалом. Тяжелые частицы, отскакивая от стенки, препятствуют прохождению к стенке падающих частиц. В то же время легкий материал, обладающий меньшей инертной массой, обтекая тяжелые частицы, проникает в пристенную область. Этот процесс приводит к уменьшению плотности и объемной концентрации дискретно распределенных по объему тяжелых частиц в области около стенки и увеличению объемной концентрации и плотности легкого компонента. Отметим, что давления компонентов смеси за отраженной УВ постепенно уравниваются и достигают конечных равновесных значений.

На рис. 5 показано распределение объемной концентрации тяжелых частиц m_2 при отражении УВ от жесткой стенки при $D = -1,5$ и $m_{10} = 0,95$. Здесь сплошные линии соответствуют падающим УВ, штриховые — отраженным, жирной линией выделен профиль в момент контакта внутренней УВ со стенкой. Профиль объемной концентрации второго компонента падающей УВ в начальный момент времени ($t = 0$) является монотонно возрастающим с точкой излома в месте возникновения внутренней УВ по легкому компоненту.

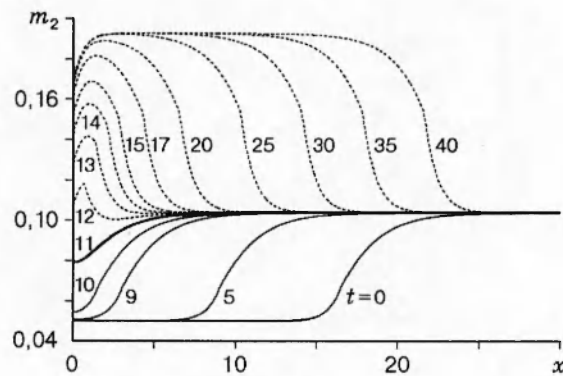


Рис. 5

Эта конфигурация устойчиво распространяется вдали от стенки ($t = 5$). С наступлением первого этапа отражения ($t = 9; 10$) объемная концентрация частиц на стенке плавно нарастает. В момент контакта УВ в первом компоненте со стенкой ($t = 11$) точка слабого разрыва объемной концентрации тяжелых частиц также находится на стенке. При этом значение m_2 на стенке несколько выше, чем в примыкающей к ней области, т. е. точка минимума смещается от стенки вправо. В момент времени $t = 12$ отраженная УВ в легком компоненте, поддерживаемая отскачившими от стенки твердыми частицами, отходит от стенки, и объемная концентрация частиц за фронтом УВ убывает. В интервале от $t = 13$ до $t = 30$ происходит постепенное увеличение объемной концентрации до конечного равновесного значения за фронтом отраженной УВ, однако в области около стенки она остается ниже теоретической. Далее при $t > 30$ сформировавшееся течение со слабым разрывом в месте нахождения внутреннего скачка по легкому компоненту устойчиво распространяется по смеси. Вблизи стенки объемная концентрация частиц сохраняет установившуюся конфигурацию, профиль которой плавно убывает от $m_{2r} = 0,193$ до $m_{2r} = 0,167$ на стенке (см. таблицу).

Рассмотренная выше проблема образования неоднородного слоя в окрестности жесткой стенки важна в прикладных задачах ударно-волнового нагружения пористых и смешанных материалов. Здесь одним из основных требований является однородность окончательного продукта. Однако экспериментальные исследования показывают, что при ударно-волновом напылении порошков на металлическую поверхность с помощью как косых [8, 9], так и прямых [10] скачков уплотнения образуются макроскопические неоднородности в виде промежуточного подслоя между наносимым материалом и поверхностью образца. При этом структура и свойства данного подслоя сильно отличаются от структуры и свойств основного материала покрытия. В нашем случае этот эффект вызван образованием небольшого слоя из сжатого легкого вещества непосредственно перед жесткой стенкой.

2. Рассмотрим отражение полностью дисперсионной УВ, начальные параметры которой расположены в областях I_{21} и I_{31} ($D = -2,5$) (см. рис. 1). При $m_{10} = 0,1$ падающая дисперсионная УВ с монотонными профилями скоростей и давлений компонентов отражается УВ с немонотонными профилями скорости в легком компоненте. Давления компонентов остаются монотонными.

При $m_{10} = 0,3$ характер поведения параметров течения иной. Скорость во втором компоненте монотонно убывает, а в первом имеет минимум. Давления монотонно возрастают на всем интервале течения. При отражении описанной структуры происходит изменение типа волновой конфигурации. Отраженная УВ имеет головной скачок во втором компоненте и монотонно возрастающий профиль скорости в первом, т. е. по нашей терминологии

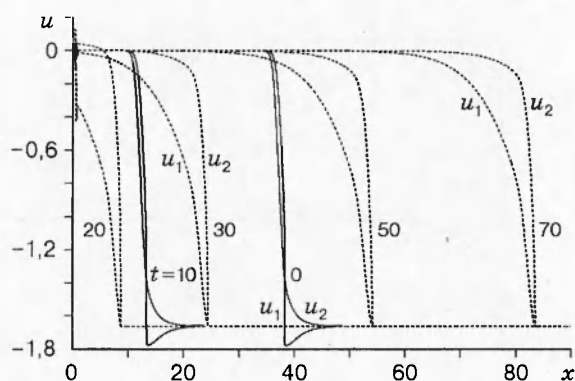


Рис. 6

является дисперсионно-замороженной. Давления в компонентах смеси монотонно возрастают. Отметим, что появляется внутренняя точка равновесия по давлениям компонентов смеси. Амплитуда давления в отраженной УВ возрастает почти в два раза по сравнению с амплитудой падающей УВ.

Увеличение m_{10} до 0,5 также приводит к устойчивому отражению УВ дисперсионного типа — дисперсионно-замороженной УВ. С увеличением начальной объемной концентрации первого компонента отношение давления за отраженной УВ к давлению за падающей УВ возрастает (см. [1, таблица]).

При $m_{10} = 0,7$, $D = -2,5$ падающая замороженно-дисперсионная УВ (области I_{22} и I_{32}) имеет внутреннюю УВ в первой фазе и непрерывное течение во второй, а отраженная является дисперсионно-замороженной УВ с головным разрывом во втором компоненте течения и непрерывным в первом (рис. 6). В приграничной области при расчете возникают небольшие возмущения решения, так как в ней происходит взаимодействие сильной падающей и отраженной УВ. С увеличением амплитуды падающей УВ ($m_{10} = 0,9$) нефизические осцилляции решения в пристенной области возрастают и времени на установление течения за отраженной УВ требуется больше. В случае $m_{10} = 0,9$ отраженная УВ не имеет разрыва во втором компоненте, так как $|u_k - D_r| = -2,809 < a_2$ ($a_2 = 3$), причем монотонный профиль скорости второго компонента имеет максимум, значение которого превышает значение скорости в равновесном состоянии за фронтом отраженной УВ.

3. В областях I_{41} и I_{51} ($D = -3,3$) при малых значениях m_{10} падающая и отраженная УВ имеют дисперсионно-замороженный тип течения. При отражении УВ возникает течение такого же типа с немонотонным профилем скорости в первом компоненте, причем ширина зоны релаксации увеличивается, например, при $m_{10} = 0,2$ — почти в 2 раза, а при $m_{10} = 0,4$ — в 3 раза. Этот эффект связан с тем, что объемное содержание жидкости за падающей УВ резко падает (при $m_{10} = 0,2$ — почти в 6,7 раза, а при $m_{10} = 0,4$ — в 5,7 раза) и связано с инерционными свойствами материалов смеси. Отметим, что амплитуда скачка во втором компоненте после отражения также возрастает. Профиль давления для падающей УВ по первому компоненту имел монотонный непрерывно возрастающий характер, а по второму — немонотонный с максимумом за головным скачком уплотнения. В то же время профиль давления отраженной волны второго компонента имеет головной скачок уплотнения с гораздо большей амплитудой, дополненный более широкой зоной релаксации. Для легкого компонента профиль давления по-прежнему остается монотонно возрастающим с резким ростом в головной части отраженной волны, при этом $P_1 < P_2$. В области при приближении к равновесному состоянию P_1 немного превышает P_2 , т. е. имеется внутренняя точка равновесия по давлениям компонентов.

Дальнейшее увеличение начальной объемной концентрации легкого компонента приводит к тому, что падающая УВ имеет замороженную двухфронтную конфигурацию, а отраженная — либо дисперсионно-замороженную при $m_{10} < m_1^*$, либо замороженную двухволновую конфигурацию при $m_{10} > m_1^*$.

4. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

После взаимодействия УВ со стенкой в ее окрестности образуется слой с пониженными плотностью и объемной концентрацией тяжелых частиц. С ростом амплитуды (скорости) УВ и начальной объемной концентрации смеси в области вблизи стенки неравновесность по отношению к конечному равновесному состоянию возрастает.

В зависимости от скорости падающей УВ и объемной концентрации несущей фазы тип отраженной УВ может как отличаться, так и не отличаться от типа падающей. В частности:

— падающая УВ дисперсионного типа может отразиться как дисперсионной, так и дисперсионно-замороженной УВ;

— замороженно-дисперсионная УВ с монотонно убывающим профилем скорости отражается замороженно-дисперсионной УВ с монотонно убывающим или немонотонным профилем скорости в первом компоненте. Замороженно-дисперсионная УВ с немонотонным профилем скорости в первом компоненте может отразиться УВ или дисперсионно-замороженного типа с монотонными профилями скорости компонентов, или дисперсионного типа с немонотонным профилем скорости во втором компоненте;

— дисперсионно-замороженная УВ, имеющая минимальное значение скорости первого компонента, отражается дисперсионно-замороженной УВ с монотонными профилями скорости;

— замороженная УВ двухфронтной конфигурации может отразиться как дисперсионно-замороженной УВ с монотонными профилями скорости, так и замороженной УВ двухфронтной конфигурации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жилин А. А., Федоров А. В. Отражение ударных волн от жесткой границы в смеси конденсированных материалов. 1. Равновесное приближение // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 5. С. 73–78.
2. Жилин А. А., Федоров А. В., Фомин В. М. Бегущая волна в двухскоростной смеси сжимаемых сред с различными давлениями // Докл. РАН. 1996. Т. 350, № 2. С. 201–205.
3. Жилин А. А., Федоров А. В. Структура ударной волны в двухскоростной смеси сжимаемых сред с различными давлениями // ПМТФ. 1998. Т. 39, № 2. С. 10–19.
4. Zhilin A. A., Fedorov A. V. The shock wave structure in a two-velocity mixture of compressible media with two pressures // Proc. of the 8th Intern. conf. on the methods of aerophys. research. Novosibirsk: ITAM, 1996. V. 2. P. 237–242.
5. Губайдуллин А. А., Ивандаев А. И., Нигматулин Р. И. Модифицированный метод «крупных частиц» для расчета нестационарных волновых процессов в многофазных дисперсных средах // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1977. Т. 17, № 6. С. 1531–1544.
6. Жилин А. А., Федоров А. В. Распространение ударных волн в двухфазной смеси с различными давлениями компонентов // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 1. С. 55–63.
7. Федоренко Р. П. Применение разностных схем высокой точности для численного решения гиперболических уравнений // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1962. Т. 2, № 6. С. 1122–1128.

8. Костюков Н. А., Кузьмин Г. Е. Критерий возникновения макронеоднородностей типа «центральной зоны» при ударно-волновом воздействии на пористые среды // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 5. С. 87–96.
9. Бабуль В., Багровский Я., Бережанский К. Взрывная прессовка порошков // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 2. С. 259–264.
10. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Папырин А. Н. Газодинамическое напыление. Исследование плоской сверхзвуковой двухфазной струи // ПМТФ. 1997. Т. 38, № 2. С. 176–183.

Поступила в редакцию 22/XII 1997 г.
