

УДК 539.63

## МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СМЕСИ С РАЗЛИЧНЫМИ СВОЙСТВАМИ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

С. А. Кинеловский<sup>\*,\*\*</sup>, К. К. Маевский<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

<sup>\*\*</sup> Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

E-mails: skin@hydro.nsc.ru, konstantinm@hydro.nsc.ru

С использованием термодинамически равновесной модели описано динамическое нагружение смесей двух и более конденсированных фаз с разными свойствами в пределах погрешности эксперимента с помощью только параметров компонентов. Исследовано поведение сплавов, рассматриваемых как смесь с теми же объемными долями компонентов. С использованием уравнения состояния типа уравнения Ми — Грюнайзена с учетом зависимости коэффициента Грюнайзена от температуры описано поведение конденсированных фаз для сплошных и пористых материалов. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными и известными результатами расчетов в широком диапазоне параметров.

**Ключевые слова:** ударная адиабата, пористая гетерогенная среда, порошковая смесь, термодинамическое равенство, аддитивное приближение, коэффициент Грюнайзена, сплавы.

Исследование поведения смесей порошковых материалов при ударно-волновом нагружении представляет интерес при решении прикладных задач динамического компактирования, ударно-волнового синтеза и др. Учитывая большое разнообразие порошковых смесей по составу и пористости, для описания таких смесей целесообразно использовать уравнения состояния (УС) только компонентов смеси. Для этого необходимо иметь достаточно простую модель, с помощью которой хорошо описываются результаты эксперимента в широком диапазоне значений давления и пористости.

Несмотря на то что существует большое количество подходов к выбору УС твердого тела при динамическом нагружении [1, 2], а также моделей для описания поведения смесей веществ [3, 4], проблема получения УС в точной математической постановке остается практически неразрешимой, так как исходные уравнения (уравнения статистической термодинамики) чрезвычайно сложны. На практике обычно проводятся некоторые упрощения, причем, как отмечается в [2], “в теории УС легче написать сложное уравнение, чем найти эффективное упрощение, т. е. такое, которое отражает главные черты реальности”. В конечном счете главным критерием применимости модельного УС является его соответствие эксперименту.

В данной работе развита предложенная в [5, 6] модель ударно-волнового нагружения пористых сред и смесей порошков. При этом основное внимание уделяется изучению

---

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 10-03-00527, 13-03-00663).

© Кинеловский С. А., Маевский К. К., 2013

смесей, у которых существенно различаются, например, плотности компонентов, а также проверке возможности рассмотрения сплавов в качестве смесей с нулевой пористостью.

Рассматриваемая модель основана на предположении о том, что при ударно-волновом нагружении все компоненты смеси, включая газ в порах, находятся в “термодинамическом равновесии”, т. е. давления, температуры и массовые скорости всех компонентов равны. Для описания поведения конденсированных фаз используются УС типа уравнения Ми — Грюнайзена, т. е. полагается, что для каждой конденсированной фазы смеси  $P(\rho, T) = P_x + P_T$  и  $E(\rho, T) = E_x + E_T$ . “Холодная” составляющая давления  $P_x$  описывается уравнением типа уравнения Тэта. Тогда для каждого  $i$ -го компонента с текущей плотностью  $\rho_{i1}$ , начальной плотностью  $\rho_{i0}$  и теплоемкостью  $c_{vi}$  УС имеет вид

$$P = A_i((\rho_{i1}/\rho_{i0})^{n_i} - 1) + \Gamma_i c_{vi}(T - T_0)\rho_{i1},$$

где  $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  — количество конденсированных компонентов смеси;  $\Gamma_i$  — коэффициент Грюнайзена. Для газа выбирается уравнение состояния идеального газа. В рамках данной модели в предположении, что ударная адиабата (УА) смеси существует, выписываются условия динамической совместности на фронте волны — условия сохранения потоков массы для каждого компонента и потоков импульса и энергии для смеси в целом (последние два условия фактически означают, что модель неявно учитывает взаимодействие компонентов).

Полученных уравнений в совокупности с УС каждого компонента достаточно для нахождения зависимостей типа  $P(U)$  или  $D(U)$  ( $P, U, D$  — давление, массовая и волновая скорости соответственно), которые можно трактовать как УА многокомпонентной смеси [5].

В частности, для смеси с двумя конденсированными компонентами можно получить выражение [5]

$$P = \left( Z_1 + Z_2 \frac{\mu_{20}\sigma_1}{\mu_{10}\sigma_2} \right) / \left( h_1 + \frac{\mu_{20}\sigma_1}{\mu_{10}\sigma_2} h_2 + \frac{(1 - \mu_{10} - \mu_{20})\sigma_1}{\mu_{10}\sigma_g} h_3 - \frac{\sigma_1}{\mu_{10}} \right), \quad (1)$$

где

$$Z_i = A_i \left[ \left( h_i - \frac{n_i + 1}{n_i - 1} \right) \sigma_i^{n_i} + \frac{2n_i\sigma_i}{n_i - 1} - h_i - 1 \right], \quad h_i = \frac{2}{\Gamma_i} + 1, \quad i = 1, 2,$$

$\sigma_1 = \rho_{11}/\rho_{10}$ ,  $\sigma_2 = \rho_{21}/\rho_{20}$ ,  $\sigma_g = \rho_{g1}/\rho_{g0}$  — степени сжатия соответствующих компонентов;  $h_3 = 2/(\gamma - 1)$ ;  $\gamma$  — показатель адиабаты;  $\rho_{g1}$ ,  $\rho_{g0}$  — текущая и начальная плотности газа;  $\mu_{10}$ ,  $\mu_{20}$  — начальные объемные доли конденсированных компонентов смеси. С учетом равенства температур компонентов получаются три уравнения для четырех неизвестных  $P$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_g$ , позволяющие построить УА смеси [5, 6]. Если в уравнениях динамической совместности положить  $\mu_{20} = \mu_{21} = 0$ , что означает отсутствие второго компонента, то получим уравнения динамической совместности для пористой среды. Если при этом дополнительно положить  $\mu_{10} = 1$ , то получим систему уравнений для монолитного материала. Обобщая соответствующие уравнения, не представляет особого труда построить УА для большего количества компонентов смеси.

В [5–9] проведено сравнение результатов расчетов по рассматриваемой модели с большим числом известных результатов экспериментов по ударному нагружению сплошных и пористых материалов, что позволило для каждого вещества определить значения входящих в модель свободных параметров  $A$ ,  $n$ ,  $\Gamma$ . В тех же работах проверена степень соответствия данной модели известным экспериментальным результатам для пористых двух- и трехкомпонентных смесей. Показано, что при  $\Gamma = \text{const}$  до значений давления, равных 200 ГПа, модель хорошо описывает экспериментальные данные. При больших давлениях необходимо вводить дополнительные предположения.

Как известно, с ростом давления величина  $\Gamma$  уменьшается. Для описания зависимости  $\Gamma(V)$  часто используется модель

$$\Gamma\rho = \text{const}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность твердой фазы [10]. Предлагались различные варианты данной зависимости в виде  $\Gamma \sim \rho^{-n}$  [11], которые тем не менее недостаточно точно описывали экспериментальные данные. Поэтому имеются основания считать, что параметр  $\Gamma$  зависит также от температуры. В [12] отмечалось: “Поскольку УС в приближении Грюнайзена с величиной  $\Gamma(V, T)$ , не зависящей от  $T$ , не дает возможности точно рассчитывать ни энтропию, ни температуру, его нельзя считать полным”. В [13] указано, что результаты эксперимента для металлов свидетельствуют о необходимости модификации УС путем учета уменьшения коэффициента Грюнайзена с ростом температуры. При определенной пористости рост давления и соответственно температуры происходит при практически постоянном или увеличивающемся объеме, в этом случае для описания результатов экспериментов зависимости только от объема недостаточно. В [14] введен коэффициент Грюнайзена  $\Gamma(V, T)$  как функция объема  $V$  и температуры, что позволило для сплошных материалов построить УА до давлений, при которых титан сжимается в 1,6 раза, свинец — в 2,2 раза. Поскольку при динамическом воздействии температура пористых материалов существенно увеличивается, для описания поведения порошковых материалов в [6] предложено другое приближение, в котором коэффициент Грюнайзена в явном виде формально зависит только от температуры. В результате анализа экспериментальных данных как монолитных, так и пористых материалов предложена эмпирическая зависимость коэффициента Грюнайзена от температуры в следующем виде [6]:

$$\Gamma(T) = \frac{1}{1/(\Gamma(T_0) - \Gamma(T_\infty)) + CT} + \Gamma(T_\infty). \quad (3)$$

Заметим, что при такой зависимости  $\Gamma(T)$  функция тепловой составляющей  $P_T$  в УС качественно совпадает с зависимостью, описанной в [15].

Использование зависимости (3) оказалось перспективным при описании поведения как сплошных, так и пористых материалов, а также порошков и смесей на их основе [6–9, 16]. Параметры  $C$ ,  $\Gamma(T_\infty)$  выбираются из условия соответствия расчетных УА известным экспериментальным результатам для каждого материала. При начальной температуре  $T = T_0$  на основе известных справочных данных при нормальных условиях выбирается значение  $\Gamma(T_0)$ . При температуре  $T = T_*$  с использованием промежуточного значения  $\Gamma(T_*)$  можно описывать данные экспериментов при средних сжатиях материала, с использованием асимптотического значения  $\Gamma(T_\infty)$  — при максимальных сжатиях. Фактически подбираются два свободных параметра:  $C$  (или  $T_*$ ) и  $\Gamma(T_\infty)$ . С учетом имеющихся подгоночных параметров для определения “холодной” составляющей ( $n$  и  $A$ ) получаем модель с четырьмя подгоночными константами, т. е. с существенно меньшим количеством констант по сравнению с предлагавшимися ранее моделями и тем более по сравнению с широкодиапазонными УС.

Использованные в расчетах значения всех входящих в УС параметров для различных материалов приведены в [6]. Эти значения позволяют в пределах погрешности эксперимента описывать динамические характеристики как монолитных, так и пористых материалов при давлениях свыше 5 ГПа. Следует отметить, что диапазон значений пористости оказался существенно шире, чем предполагалось при разработке модели: модель позволяет описывать динамические характеристики смесей при плотностях, как в 1,5–2 раза, так и на порядок меньших плотности монолита [16]. Можно ожидать, что эти значения свободных констант могут использоваться для описания динамических характеристик любых смесей,

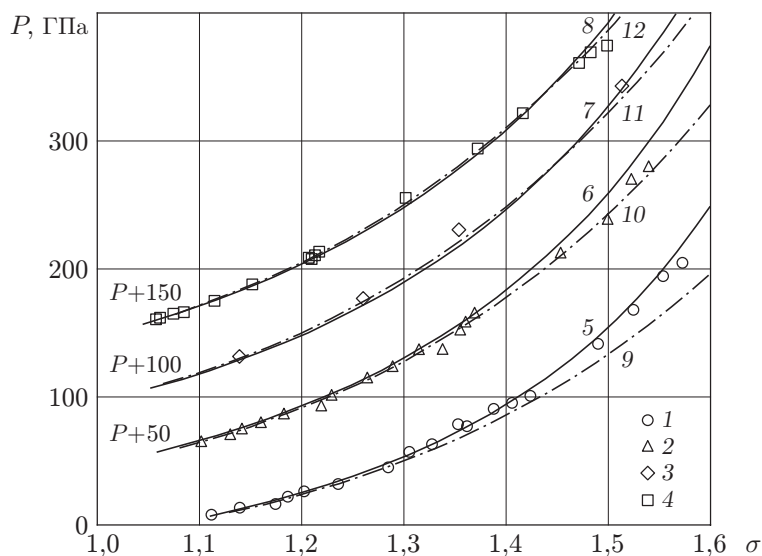


Рис. 1. Расчетные (линии) и экспериментальные (точки) зависимости давления от коэффициента сжатия ( $\sigma$ ) пористой смеси вольфрама и меди:  
 1–4 — экспериментальные данные [10], 5–12 — результаты расчета (5–8 — с учетом (3), 9–12 — в рамках аддитивного приближения); 1, 5, 9 —  $\mu = 0,936$ ; 2, 6, 10 —  $\mu = 0,978$ ; 3, 7, 11 —  $\mu = 0,981$ ; 4, 8, 12 —  $\mu = 0,986$

изготовленных на основе веществ с уже определенными параметрами модели, требуется определить только объемные доли компонентов.

Учет пористости в рамках рассматриваемой модели с использованием зависимости (3) для смеси Cu–W (элконит) [10] позволил достоверно описать имеющиеся экспериментальные данные без существенных погрешностей для всех значений пористости элконита. Поскольку пористость  $\mu$  определяется как отношение плотностей пористого и сплошного материалов, она фактически является суммой объемных долей конденсированных компонентов. На рис. 1 представлены  $\sigma$  пористой смеси W и Cu. Для наглядности на рис. 1–4 расчетные и экспериментальные данные для различных значений пористости приведены со сдвигом по оси  $P$  с шагом, равным 50 или 100 ГПа.

Для сплавов расчет в аддитивном приближении с учетом только равенства давлений в ряде случаев позволяет получить удовлетворительные результаты [17]. Расчеты при пористости, равной 0,98, когда смесь рассматривается как сплав [17], и расчеты с учетом равенства давлений и температур [6] соответствуют известным экспериментальным данным. Можно предположить, что данная модель позволяет рассчитывать поведение сплавов при динамических нагрузках, рассматривая сплав как смесь, у которой отсутствует пористость. Расчеты, выполненные для сплавов, подтвердили это предположение для давлений свыше 5 ГПа, при которых данная модель достоверно описывает поведение чистых веществ. На рис. 2 для сплавов никеля и меди, а также железа и меди представлены расчетные и экспериментальные зависимости  $P(\sigma)$ . Видно, что в пределах погрешности эксперимента эти результаты хорошо согласуются.

Использование модели поведения сплавов при динамических нагрузках позволяет выполнить расчеты нагружения смесей, в состав которых входят порошки на основе сплавов. В этом случае, рассматривая сплав как смесь порошков с теми же объемными долями компонентов, задачу можно свести к определению объемных долей всех компонентов смеси, в том числе входящих в состав сплавов. С использованием только параметров компонентов проводится расчет динамических параметров многокомпонентной смеси. Выполнены

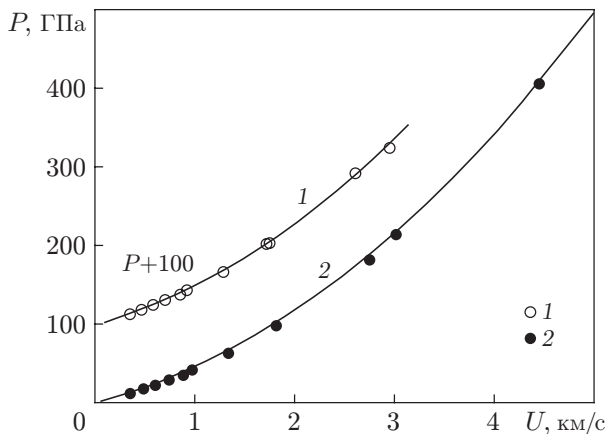


Рис. 2

Рис. 2. Расчетные (линии) и экспериментальные [18] (точки) зависимости давления от массовой скорости:

1 — сплав никеля с медью, 2 — сплав железа с медью

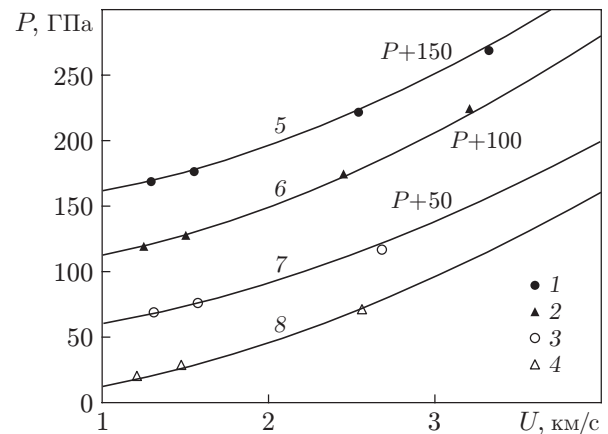


Рис. 3

Рис. 3. Расчетные (линии) и экспериментальные [18] (точки) зависимости давления от массовой скорости для смеси алмаза с порошком сплава ВК6:

1 — ВК6 + алмаз (11,2 %) ( $\rho_0 = 5,68 \text{ г/см}^3$ ,  $\mu = 0,518$ ); 2 — ВК6 + алмаз (13,2 %) ( $\rho_0 = 5,72 \text{ г/см}^3$ ,  $\mu = 0,547$ ); 3 — ВК6 + алмаз (26,2 %) ( $\rho_0 = 4,61 \text{ г/см}^3$ ,  $\mu = 0,571$ ); 4 — ВК6 + алмаз (29,8 %) ( $\rho_0 = 4,68 \text{ г/см}^3$ ,  $\mu = 0,616$ ); 1, 3 — частицы алмаза АМС 14/10 размером  $10 \div 14 \text{ мкм}$ , 2, 4 — частицы алмаза АС 50 размером  $200 \div 250 \text{ мкм}$

расчеты для смеси алмаза с ВК6 (сплав карбида вольфрама с кобальтом). На основе данных [18] о массовых долях компонентов сплава и составе смеси определены объемные доли карбида вольфрама, кобальта и алмаза в смеси, а также параметры уравнения состояния каждого компонента. С использованием полученных результатов проведены расчеты для смеси с тремя конденсированными фазами, для каждой из которых известна начальная объемная доля. На рис. 3 приведены расчетные и экспериментальные зависимости  $P(U)$  для смеси алмаза с порошком сплава ВК6 при различных значениях пористости и начальной плотности смеси  $\rho_0$ . Видно, что результаты расчетов адекватно описывают известные экспериментальные данные. Это свидетельствует о возможности использования данной модели при описании поведения пористых смесей, полученных на основе не только чистых веществ, но и сплавов.

Для дальнейшего исследования области применимости предложенной модели рассматривались смеси с компонентами, плотности которых существенно различаются, в частности смесь парафина с вольфрамом. Для данной смеси имеются результаты расчетов по различным моделям, как учитывающим взаимодействие компонентов, так и не учитывающим его. Это позволяет провести сравнение различных подходов и выбрать наиболее адекватное описание динамических нагрузок.

На рис. 4 приведены результаты расчетов по рассматриваемой модели и данные, полученные на основе экспериментов [19], для непористой смеси вольфрама и парафина с различными массовыми долями компонентов. Видно, что в пределах погрешности эксперимента расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются.

В работе [20] выполнены расчеты для смеси парафина и вольфрама с использованием трех моделей, которые с разной степенью точности описывают результаты экспериментов [19]. Приводятся результаты расчетов, выполненных с помощью следующих методов: SC-критерий (single component) [19, 21], KEA-метод (kinetic energy averaging) [22]. Эти два

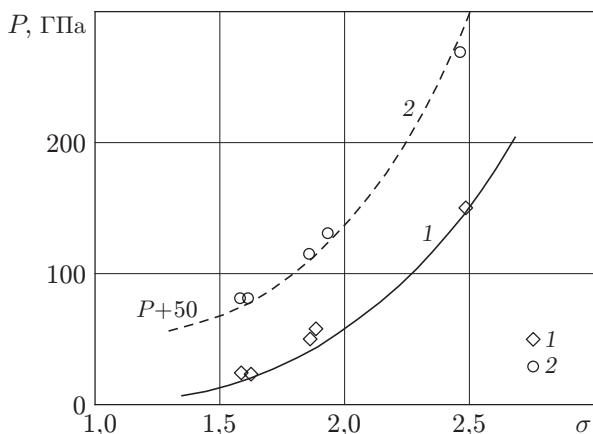


Рис. 4

Рис. 4. Расчетные (линии) и экспериментальные [19] (точки) зависимости давления от коэффициента сжатия ( $\sigma$ ) смеси вольфрама и парафина:  
 1 — парафин (16 %) — вольфрам (84 %) ( $\rho_0 = 4,53 \text{ г/см}^3$ ), 2 — парафин (33,8 %) — вольфрам (66,2 %) ( $\rho_0 = 2,44 \text{ г/см}^3$ )

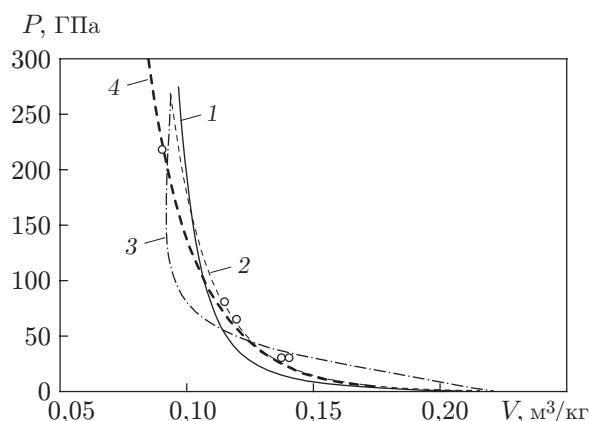


Рис. 5

Рис. 5. Расчетные (линии) и экспериментальные [19] (точки) зависимости давления от удельного объема смеси вольфрама (66,2 %) и парафина (33,8 %):  
 1–4 — результаты расчетов с использованием различных методов (1 — SC-критерий [20], 2 — КЕА-метод [20], 3 — ТЕ-метод [20], 4 — ТЕС-метод, предложенный в данной работе)

метода основаны на принципе аддитивности, который широко используется для сплавов при относительно невысоких давлениях, однако не учитывает взаимодействие компонентов. В третьем ТЕ-методе (turbulent entropy) предпринята попытка учесть взаимодействие компонентов, вводя дополнительно турбулентную энтропию [4].

На рис. 5, взятом из работы [20], представлены расчетные и экспериментальные зависимости давления от удельного объема смеси парафина и вольфрама. Здесь же приведена расчетная кривая, полученная с помощью предложенного в данной работе метода расчета, названного ТЕС-методом (thermodynamic equilibrium component). Из рис. 5 следует, что результаты расчетов, выполненных с использованием принципа аддитивности, при давлении менее 100 ГПа хорошо согласуются с экспериментальными данными, при более высоком давлении они лучше согласуются с результатами расчета по ТЕ-методу, который, однако, не является достоверным при давлении ниже 100 ГПа. Предлагаемая в данной работе модель позволяет описать экспериментальные данные во всем диапазоне.

На рис. 6 представлены результаты расчетов по указанным выше моделям для смеси вольфрама (84 %) и парафина (16 %). Видно, что при значениях давления, не превышающих 70 ГПа, результаты расчетов по трем моделям близки к экспериментальным данным, при большем давлении с ними лучше согласуются результаты расчетов по моделям, в которых учитывается взаимодействие компонентов смеси.

Ранее для смесей вольфрама и парафина проводились также расчеты с учетом и без учета взаимодействия компонентов с использованием модели, предложенной в [23]. В этом случае, как отмечается в [23], “теоретические зависимости  $P(D)$  без учета кластерного взаимодействия лежат выше экспериментальных. Теоретические ударные адиабаты с учетом кластерного взаимодействия лежат ниже экспериментальных адиабат”. Результаты расчета зависимости  $P(D)$  по рассматриваемой в данной работе модели приведены на

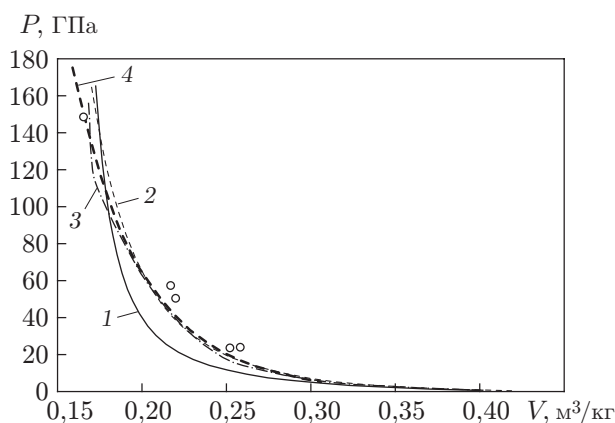


Рис. 6

Рис. 6. Расчетные (линии) и экспериментальные [19] (точки) зависимости давления от удельного объема смеси вольфрама (84 %) и парафина (16 %) (обозначения те же, что на рис. 5)

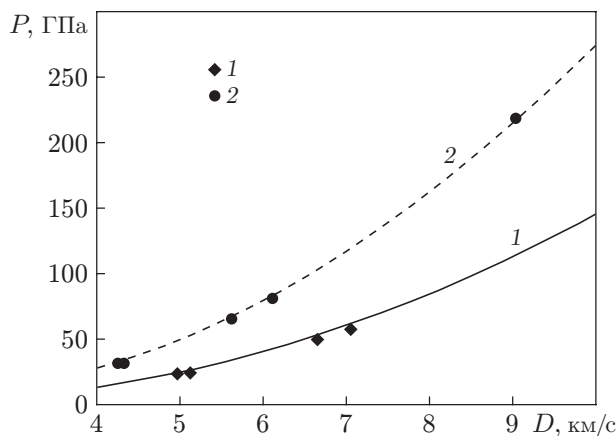


Рис. 7

Рис. 7. Расчетные (линии) и экспериментальные [19] (точки) зависимости давления от волновой скорости (УА) смеси вольфрама и парафина:

1 — парафин (16 %) — вольфрам (84 %); 2 — парафин (33,8 %) — вольфрам (66,2 %)

рис. 7. В пределах погрешности эксперимента расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются во всем диапазоне.

Представленные результаты показывают, что модель, основанная на равенстве давлений, температур и скоростей компонентов смеси и использующая только параметры компонентов, является более предпочтительной. Результаты расчетов по модели, в которой используется условие равенства скоростей компонентов смеси, хорошо соответствуют экспериментальным данным даже в случае существенного различия плотностей компонентов. Это означает, что фронт ударной волны в такой смеси фактически является размытой областью, внутри которой и происходит выравнивание скоростей компонентов. Факт существования такой области отмечен в [24].

Таким образом, достаточно простая модель динамического нагружения пористых материалов позволяет проводить достоверные расчеты для смесей с компонентами, имеющими существенно различные свойства. Показано, что предложенная в настоящей работе модель адекватно описывает известные экспериментальные результаты в случае смесей с компонентами, плотности которых могут различаться более чем в 10 раз, а также в случае смесей, в состав которых входят порошки, полученные из сплавов. Данная модель позволяет расширить класс материалов, входящих в состав смесей, для которых можно получить достоверные оценки результатов воздействия ударных волн на порошковые смеси.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Фортон В. Е.** Ударные волны и экстремальные состояния вещества / Под ред. В. Е. Фортона, Л. В. Альтшулера, Р. Ф. Трунина, А. И. Фунтикова. М.: Наука, 2000.
2. **Копышев В. К., Медведев А. Б.** Обзор принципиальных идей моделей уравнения состояния во ВНИИЭФ // Высокие плотности энергии. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 271–283.

3. **Чарахчян А. А., Милявский В. В., Хищенко К. В.** Применение моделей смеси для анализа ударно-волновых экспериментов с неполным фазовым превращением // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47, № 2. С. 254–261.
4. **Gavrilyuk S. L., Saurel R.** Rankine — Hugoniot relations for shocks in heterogeneous mixtures // J. Fluid Mech. 2007. V. 575. P. 495–507.
5. **Кинеловский С. А., Маевский К. К., Родиков А. С.** Одна модель расчета ударной адиабаты пористой гетерогенной среды // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. 2008. Т. 3, № 1. С. 3–11.
6. **Кинеловский С. А., Маевский К. К.** Расчет ударной адиабаты порошковых смесей с учетом зависимости коэффициента Грюнайзена от температуры // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. 2009. Т. 4, № 4. С. 71–78.
7. **Кинеловский С. А., Маевский К. К.** Расчет ударной адиабаты пористых порошковых смесей // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тр. междунар. конф. “XI Харитоновские тематические чтения”. Саров, 16–20 марта 2009 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2009. С. 239–244.
8. **Кинеловский С. А., Маевский К. К.** Расчет динамического воздействия на пористые материалы // Забобахинские научные чтения: Тр. 10-й Междунар. конф., Снежинск, 15–19 марта 2010 г. Снежинск: Всерос. науч.-исслед. ин-т техн. физики, 2010. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [http://www.vniitf.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=592%3A-2010&catid=102%3A-2010&Itemid=315&lang=ru](http://www.vniitf.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=592%3A-2010&catid=102%3A-2010&Itemid=315&lang=ru).
9. **Maevskij K. K., Kinelovskij S. A.** Model calculation of dynamic effects on porous materials and mixes under high energy density condition // Physics of extreme states of matter — 2011, Elbrus, 1–6 Mar. 2011 / Ed. by V. E. Fortov, et al. Chernogolovka: Inst. of probl. of chem. phys. RAS, 2011. P. 112–115.
10. **McQueen R. G., Marsh S. P., Taylor J. W., et al.** The equation of state of solids from shock wave studies // High velocity impact phenomena / Ed. by R. Kinslow. N. Y.: Acad. Press, 1970. P. 239.
11. **Boehler R., Ramakrishnan J.** Experimental results on the pressure dependence of the Grüneisen parameter // J. Geophys. Res. Ser. B. 1980. V. 85. P. 6996–7002.
12. **Физика высоких плотностей энергии** / Под ред. П. Кальдиrola, Г. Кнопфеля. М.: Мир, 1974.
13. **Кормер С. Б., Фунтиков А. И., Урлин В. Д., Колесникова А. Н.** Динамическое сжатие пористых металлов и уравнение состояния с переменной теплоемкостью при высоких температурах // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1962. Т. 42, № 3. С. 686–702.
14. **Молодец А. М., Молодец М. А.** Температурная зависимость функции Грюнайзена химических элементов // Хим. физика. 1997. Т. 16, № 5. С. 122–126.
15. **Бушман А. Ф., Форттов В. Е.** Модели уравнения состояния вещества // Успехи физ. наук. 1983. Т. 140, № 2. С. 177–232.
16. **Маевский К. К., Кинеловский С. А.** Расчет ударно-волнового воздействия на пористые материалы и смеси // Материалы науч.-координац. сессии “Исследования неидеальной плазмы”, Москва, 1–2 дек. 2010 г. М.: Объед. ин-т высоких температур РАН, 2010. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [http://www.ihed.gas.ru/npp2010/pres/maevskiy\\_npp-2010.pdf](http://www.ihed.gas.ru/npp2010/pres/maevskiy_npp-2010.pdf).
17. **Белякова М. Ю., Жерноклетов М. В., Сутулов Ю. Н., Трунин Р. Ф.** Ударное сжатие металлических сплавов // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1991. № 1. С. 99–106.
18. **Трунин Р. Ф.** Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Р. Ф. Трунина, Л. Ф. Гударенко, М. В. Жерноклетова, Г. В. Симакова. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2006.



19. **Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крупникова В. П.** Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // ПМТФ. 1971. № 4. С. 152–155.
20. **Oren E. P., Francois X. J.** Comparison of methods for calculating the shock Hugoniot of mixtures // Shock Waves. 2010. V. 20. P. 73–83.
21. **Saurel R., Le Metayer O., Massoni J., Gavrilyuk S.** Shock jump relations for multiphase mixtures with stiff mechanical relaxation // Shock Waves. 2007. V. 16. P. 209–232.
22. **Batsanov S. S.** Effects of explosions on materials: modification and synthesis under high-pressure shock compression. Berlin: Springer, 1994.
23. **Куропатенко В. Ф.** Законы сохранения в моделях многокомпонентных сред // Сб. материалов науч. конф. “Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики”, Томск, 12–14 апр. 2011 г. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2012. С. 38–41.
24. **Долгобородов А. Ю., Воскобойников И. М., Толстов И. К., Судариков А. В.** Особенности распространения ударных волн в смесях // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 3. С. 106–111.

*Поступила в редакцию 4/IV 2012 г.,  
в окончательном варианте — 29/I 2013 г.*

---