

*К.К. Маевский, С.А. Кинеловский*

### **Модель расчета динамического воздействия на пористые смеси при высокой плотности энергии**

*K.K. Maevsky, S.A. Kinelovsky*

### **The Model to Calculate the Dynamic Effects on Porous Mixture at High Power Density**

Представлена модель расчета ударно-волнового нагружения пористых сред и смесей порошков с учетом наличия воздуха в порах. Для конденсированных фаз используются уравнения состояния типа Тэта и Ми-Грюнайзена с коэффициентом Грюнайзена.

**Ключевые слова:** ударная адиабата, пористая гетерогенная среда, порошковая смесь, коэффициент Грюнайзена.

Исследования поведения пористых смесей порошковых материалов при ударно-волновом нагружении представляют интерес для многих задач современной науки. При описании поведения порошковых смесей желательно использовать уравнения состояния только компонентов смеси, а для этого необходимо иметь достаточно простую модель, дающую хорошее соответствие эксперименту в широком диапазоне давлений.

Несмотря на большое число подходов к выбору уравнения состояния твердого тела при динамических нагрузках [1, с. 271], а также появившихся в последнее время моделей для описания поведения смесей веществ [2, с. 254], проблема расчета уравнения состояния в ее точной математической постановке практически неразрешима, так как исходные уравнения чрезвычайно сложны. Поэтому на практике проводят многочисленные упрощения, как отмечается в [1, с. 272], в теории уравнения состояния легче написать сложное уравнение, чем найти эффективное упрощение, т.е. такое, которое отражает главные черты реальности. Одним из широко распространенных является подход Ми-Грюнайзена.

В данной работе представлены результаты по развитию апробированной в [3, с. 3; 4, с. 71] модели расчета ударно-волнового нагружения пористых сред и смесей порошков с учетом наличия воздуха в порах. Модель основана на предположении, что все компоненты смеси, включая газ в порах, при ударно-волновом нагружении находятся в термодинамическом равновесии. Для описания поведения конденсированных фаз используются уравнения состояния типа Ми-Грюнайзена. Запишем систему уравнений, определяющих состояние конденса-

This paper presents a model for calculating the shock-wave loading of porous media and powder mixtures based on the availability of air in the pores. For condensed phases are used equations such as the Tate and Mi-Gruneisen equations with the Gruneisen coefficient.

**Key words:** shock adiabat, porous heterogeneous media, powder mixture, Gruneisen coefficient.

рованных фаз пористой смеси, полагая, что  $P(\rho, T) = P_X + P_T$  и  $E(\rho, T) = E_X + E_T$ . Холодная составляющая давления  $P_X$  описывается уравнением типа уравнения Тэта. Тогда уравнения состояния для каждой  $i$ -й компоненты с текущей и начальной плотностью  $\rho_i, \rho_{i0}$  и теплоемкостью  $c_{vi}$  имеют вид:

$$P = A_i * \left( \left( \rho_i / \rho_{i0} \right)^{n_i} - 1 \right) + G_i * c_{vi} * (T - T_0) * \rho_i,$$

где  $i = 1, 2, \dots$

Простота и удобство использования этого уравнения обусловили его широкую популярность, поскольку для каждого вещества, помимо коэффициента Грюнайзена  $G$  либо взаимосвязанной с ним величины предельного сжатия  $h = 1 + 2/G$ , оно содержит только две подгоночных константы:  $A$  и  $n$  [1, с. 273]. Для газа берем уравнения состояния идеального газа. В рамках данной модели в предположении, что ударная адиабата смеси существует, выписываются условия динамической совместности на фронте волны: условия сохранения потока массы для каждого компонента смеси и условия сохранения потоков импульса и энергии для смеси в целом. В [3, с. 3] показано, что полученных уравнений в совокупности с уравнением состояния 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 ударную адиабату многокомпонентной смеси.

На основании качественного рассмотрения имеющихся данных предлагается коэффициент Грюнайзена в следующем виде

$$G(T) = ((G(T_0) - G(T_\infty))^{-1} + C * (T - T_0))^{-1} + G(T_\infty). \quad (1)$$

Параметры  $C$ ,  $\Gamma(T_0)$ ,  $\Gamma(T_\infty)$  выбираются из условия соответствия расчетных ударных адиабат известным экспериментальным результатам для каждого материала. При начальной температуре  $T = T_0$  берется  $\Gamma(T_0)$  на основании известных данных при нормальных условиях, промежуточное значение  $\Gamma(T^*)$  при температуре  $T = T^*$  позволяет описывать экспериментальные точки при средних сжатиях материала, асимптотическое значение  $\Gamma(T_\infty)$  – при максимальных сжатиях. Подобранные параметры позволили получить хорошее совпадение расчетов с экспериментами как для сплошных, так и для пористых материалов в широком диапазоне величины пористости (пористость  $\mu$  определяется как отношение плотностей пористого и сплошного материалов).

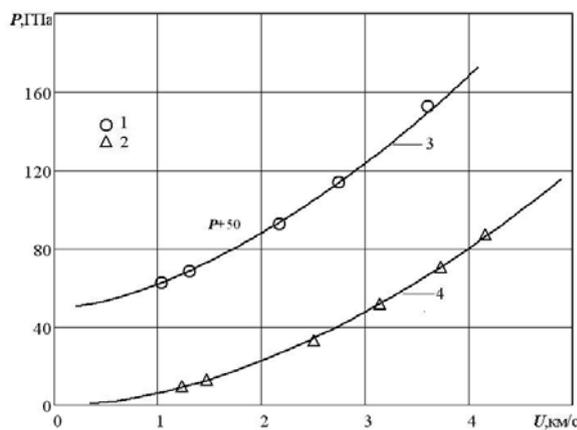


Рис. 1. Расчет и эксперимент для ударной адиабаты смеси титана и алмаза: 1 –  $\mu = 0.760-0.772$ ; 2 –  $\mu = 0.591-0.600$  [5, с. 246]; 3 – расчет  $\mu = 0.769$ ; 4 –  $\mu = 0.595$

Соответствие модельных расчетов для чистых веществ позволило перейти к расчетам смесей. Расчеты для смеси титан–углерод (алмаз), приведенные на рисунке 1 с различными значениями пористости, хорошо соответствуют результатам экспериментов [5, с. 246]. Пористость в каждой группе неслучайно отличалась друг от друга. Расчет по средней пористости для каждой группы точек хорошо согласован с имеющимися данными. Произведены расчеты и для других известных пористых смесей, по которым имеются экспериментальные данные. Смесь вольфрама и парафина, для которой получено хорошее описание для диапазона давлений выше 5 ГПа, интересна тем, что в нее входят вещества с существенно

разными плотностями. Тем не менее получено совпадение в пределах точности эксперимента не только на диаграмме давление–массовая скорость, но и на зависимости давление–сжатие, соответствие на которой получить, как правило, существенно сложнее (рис. 2).

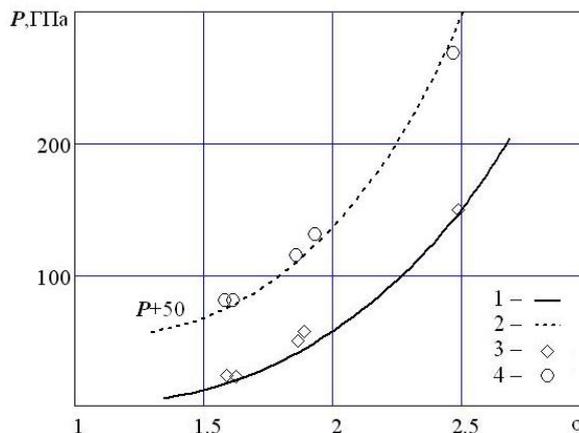


Рис. 2. Расчет и эксперимент для ударной адиабаты смеси вольфрама и парафина в координатах P–сжатие смеси. Расчет: 1 – wt% Paraffin(16) – W(84); 2 – wt% Paraffin(33.8) – W(66.2). Эксперимент – [6, с. 152]

Учитывая хорошую достоверность описания поведения пористых смесей, появляется возможность расчета полиморфных фазовых переходов, где в момент перехода материал можно рассматривать как смесь исходного и конечного вещества. Произведены расчеты ударной адиабаты для пористого графита и кварца с учетом фазового перехода.

Таким образом, предложена достаточно простая модель динамического воздействия на пористые материалы, позволяющая производить достоверные расчеты для пористых смесей. Показано, что модель адекватно описывает известные экспериментальные результаты для достаточно многих сплошных и пористых материалов, для которых имеются экспериментальные данные. Данная модель может быть использована для подбора соотношений компонентов смеси с целью получения заданных параметров сплошных и пористых материалов после воздействия ударными волнами. Учитывая хорошую достоверность описания поведения пористых смесей, получена возможность расчета фазовых переходов при ударном нагружении.

### Библиографический список

1. Копышев В.К., Медведев А.Б. Обзор принципиальных идей моделей уравнения состояния во ВНИИЭФ // Высокие плотности энергии. – Саров, 1997.  
 2. Чарахчян А.А., Милявский В.В., Хищенко К.В. Применение моделей смеси для анализа ударно-волновых

экспериментов с неполным фазовым превращением // ТВТ. – 2009. – Т. 47, №2.  
 3. Кинеловский С.А., Маевский К.К., Родиков А.С. Одна модель расчета ударной адиабаты пористой гетерогенной среды // Вестник НГУ. Сер.: Физика. – 2008. – Т. 3, №1.

4. Кинеловский С.А., Маевский К.К. Расчет ударной адиабаты порошковых смесей с учетом зависимости коэффициента Грюнайзена от температуры // Вестник НГУ. Сер.: Физика. – 2009. – Т. 4, №4.

5. Трунин Р.Ф., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В., Симаков Г.В. Экспериментальные данные по ударно-

волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / под ред. Р.Ф. Трунина. – Саров, 2006.

6. Алексеев Ю.Ф., Альтшулер Л.В., Крупникова В.П. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // ПМТФ. – 1971. – №4.