

*Расчет ударно-волнового
воздействия на пористые материалы
и смеси*

*Calculation of the dynamic effects on
porous materials and mixtures*

К.К. Маевский, С.А. Кинеловский,

*Институт гидродинамики
им. М. А. Лаврентьева СО РАН*

Расчетная модель

В данной работе представлены результаты по развитию модели расчета ударно-волнового нагружения пористых сред и механических смесей порошков с учетом наличия воздуха в порах. Для описания поведения конденсированных фаз используются уравнения состояния типа Ми-Грюнайзена $P(V, E)$, которое будем рассматривать в виде $P(\rho, T)$, где $\rho = 1/V$

$$P(\rho, T) = P_x + P_T$$

$$P_T = \rho * \Gamma * E_T$$

Уравнение состояния для каждой конденсированной компоненты, при

$$E_T = \Gamma_i * c_{vi} * (T - T_0) * \rho_i$$

$$P = A_i * \left[\left(\frac{\rho_i}{\rho_{i0}} \right)^{n_i} - 1 \right] + \Gamma_i * c_{vi} * (T - T_0) * \rho_i$$

где Γ_i – коэффициент Грюнайзена, в первом приближении - *const*, значение берется при нормальных условиях T_0 ,

ρ_{i0} – начальная плотность ρ_i – текущая плотность, i – номер конденсированной компоненты смеси,

T_0 – начальная температура, T – текущая температура,

$c_{vi} = \text{const}$ – значение берется при нормальных условиях T_0 .

Для газа берем уравнение состояния идеального газа.

1. Модель расчета смеси основана на предположении, что все вещества, входящие в состав смеси, включая газ в порах, при ударно-волновом нагружении находятся в термодинамическом равновесии:
 - односкоростное и однотемпературное приближения;
 - одинаковые давления для всех компонент смеси.
2. 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

Расчетная модель

Для смеси с двумя твердыми компонентами можно получить следующие выражения:

$$\rho_{10} * \mu_{10} * D = \rho_{11} * \mu_{11} * (D - U) \quad (1)$$

$$\rho_{20} * \mu_{20} * D = \rho_{21} * \mu_{21} * (D - U) \quad (2)$$

$$\rho_{g0} * (1 - \mu_{10} - \mu_{20}) * D = \rho_{g1} * (1 - \mu_{11} - \mu_{21}) * (D - U) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} P_0 + \rho_{10} * \mu_{10} * D^2 + \rho_{20} * \mu_{20} * D^2 + \rho_{g0} * (1 - \mu_{10} - \mu_{20}) * D^2 = \\ = P_1 + \rho_{11} * \mu_{11} * (D - U)^2 + \rho_{21} * \mu_{21} * (D - U)^2 + \rho_{g1} * (1 - \mu_{11} - \mu_{21}) * (D - U)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_0 * (D - U) + \rho_{10} * \mu_{10} * D^3 + \rho_{20} * \mu_{20} * D^3 + \rho_{g0} * (1 - \mu_{10} - \mu_{20}) * D^3 = \\ = P_1 * (D - U) + \rho_{11} * \mu_{11} * (D - U)^3 + \rho_{21} * \mu_{21} * (D - U)^3 + \rho_{g1} * (1 - \mu_{11} - \mu_{21}) * (D - U)^3 + \\ + \rho_{11} * \varepsilon_1 * (D - U) * \mu_{11} + \varepsilon_2 * \rho_{21} * \mu_{21} * (D - U) + \rho_{g1} * (1 - \mu_{11} - \mu_{21}) * (D - U) * \varepsilon_g \end{aligned} \quad (5)$$

В приведенных формулах

ε_i - удельная внутренняя энергия для каждой из конденсированных компонент,

ε_g - удельная внутренняя энергия газа; D - скорость распространения ударной волны по невозмущенному веществу; U - скачок массовой скорости на фронте ударной волны,

ρ_{i0} - плотность i -ой фазы вещества перед фронтом ударной волны,

ρ_{i1} - за фронтом,

ρ_{g0}, ρ_{g1} - плотности газа перед и за фронтом,

μ_{i0} - объемная концентрация i -ой фазы вещества перед фронтом ударной волны,

μ_{i1} - объемная концентрация i -ой фазы вещества за фронтом ударной волны,

Полученных уравнений в совокупности с УС каждого компонента и условием равенства температур достаточно для нахождения зависимостей типа $P(U)$ или $D(U)$, которые можно трактовать как УА многокомпонентной смеси. [Кинеловский С.А., Маевский К.К., Родиков А.С. // Вестник НГУ. Физика. 2008. Т.3, вып. 1. С. 3-11]

Из (1) – (5) можно получить следующие уравнения

$$P = \frac{P_1 + P_2 * \frac{\mu_{20} * \sigma_1}{\mu_{10} * \sigma_2}}{h_1 + \frac{\mu_{20} * \sigma_1}{\mu_{10} * \sigma_2} * h_2 + \frac{(1 - \mu_{10} - \mu_{20}) * \sigma_1}{\mu_{10} * \sigma_g} * h_3} \quad \text{где} \quad P_i = A_i * \left[\left[h_i - \frac{n_i + 1}{n_i - 1} \right] * \sigma_i^{n_i} + \frac{2 * n_i * \sigma_i}{n_i - 1} - h_i - 1 \right] \quad (6)$$

$$h_i = \frac{2}{\Gamma_i} + 1 \quad i=1,2$$

Здесь $\sigma_1 = \rho_{11}/\rho_{10}$, $\sigma_2 = \rho_{21}/\rho_{20}$, $\sigma_g = \rho_{g1}/\rho_{g0}$ – степени сжатия соответствующего компонента, Γ_i, n_i, A_i – коэффициент Грюнайзена и параметры соответствующего твердого компонента, $h_3 = 2/(\gamma - 1)$, где показатель адиабаты газа $\gamma = 1,4$

Учитывая равенство температур компонент, получаем следующие выражения:

$$P = \frac{A_1 * (\sigma_1^{n_1} - 1) - A_2 * (\sigma_2^{n_2} - 1) * \frac{c_{v1} * \Gamma_1 * \sigma_1 * \rho_{10}}{c_{v2} * \Gamma_2 * \sigma_2 * \rho_{20}}}{1 - \frac{c_{v1} * \Gamma_1 * \sigma_1 * \rho_{10}}{c_{v2} * \Gamma_2 * \sigma_2 * \rho_{20}}} \quad (7) \quad P = \frac{A_1 * (\sigma_1^{n_1} - 1)}{1 - \frac{c_{v1} * \Gamma_1 * \sigma_1 * \rho_{10}}{c_{vg} * (\gamma - 1) * \sigma_g * \rho_{g0}}} \quad (8)$$

Для степени сжатия среды в целом можно получить выражение: $\sigma = \left[\frac{\mu_{10}}{\sigma_1} + \frac{\mu_{20}}{\sigma_2} + \frac{\mu_g}{\sigma_g} \right]^{-1}$ где $\mu_g = 1 - \mu_{10} - \mu_{20}$

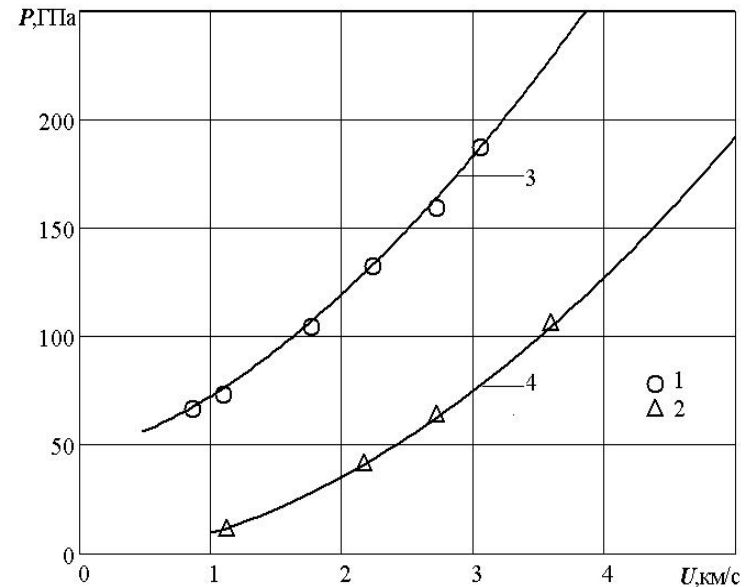
Имеем в итоге 3 уравнения (6), (7) и (8) для 4-х переменных $P, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_g$ позволяющие построить УА смеси типа $P(\sigma)$. Волновая D и массовая U скорости, а также температура определяются следующими уравнениями

$$D = \sqrt{\frac{P}{R_0 * \left[1 - \frac{1}{\sigma} \right]}} \quad R_0 = \mu_{10} * \rho_{10} + \mu_{20} * \rho_{20} + \mu_g * \rho_{g0} \quad \text{- начальная плотность среды}$$

$$U = \frac{P}{R_0 * D} \quad T = \frac{P - A_1 * (\sigma_1^{n_1} - 1)}{c_{v1} * \Gamma_1 * \sigma_1 * \rho_{10}}$$

В предположении $\Gamma = \text{const}$ получены следующие результаты:

- проведен подбор параметров Γ_i, n_i, A_i для сплошных материалов
- проведено сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными результатами разных авторов для сплошных и пористых сред
- рассчитаны ударные адиабаты одинарного и двойного сжатия ударными волнами и адиабатическая разгрузка
- проведены расчеты для пористых порошковых смесей для двух твердых фаз, используя только параметры компонентов.
- определена область применимости $\Gamma = \text{const}$ по давлению и пористости



Ударные адиабаты смеси порошков меди и алмаза

Эксперимент (ТРУНИН и др. 2006). 1 – пористость 1.194-1.234;
2 - 1.616-1.69;

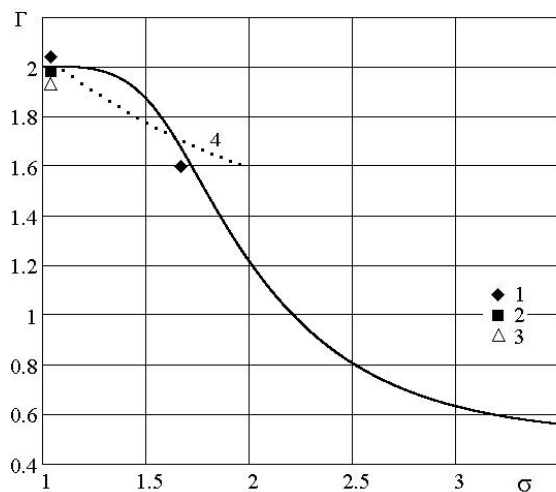
Расчет по предлагаемой модели с $\Gamma = \text{const}$

3 - для пористости $m=1.21$, 4 - для пористости $m=1.63$

Для описания поведения вещества при давлениях и пористостях, где $\Gamma = \text{const}$ не дает достоверного описания, предлагается коэффициент Грюнайзена в явном виде зависящий только от температуры в следующем виде:

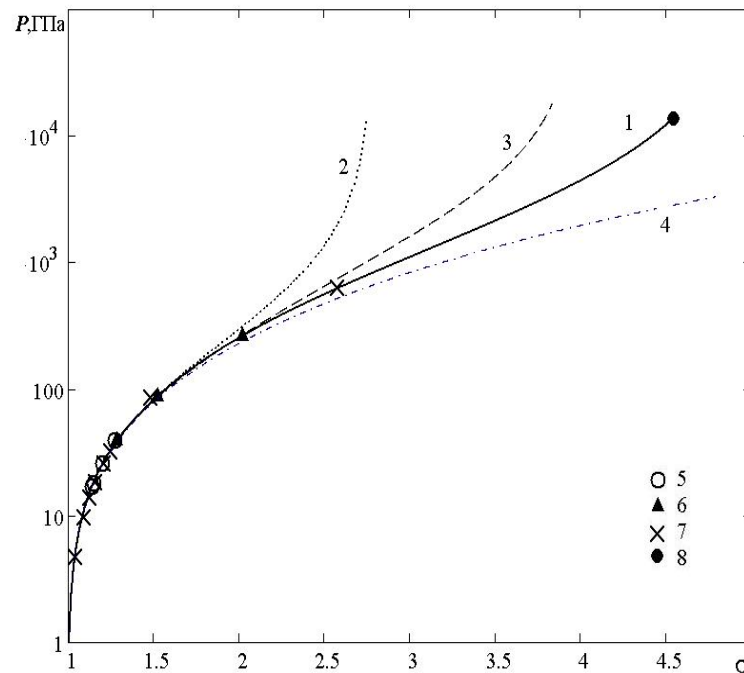
$$\Gamma(T) = \frac{1}{\frac{1}{\Gamma(T_0) - \Gamma(T_\infty)} + C * (T - T_0)} + \Gamma(T_\infty) \quad (9)$$

- при начальной температуре берется $\Gamma(T_0)$ на основании известных данных при нормальных условиях.
- асимптотическое значение $\Gamma(T_\infty)$ позволяет описывать экспериментальные точки при максимальных сжатиях.
- параметр C выбираются из условия соответствия расчетных ударных адиабат известным экспериментальным результатам для каждого материала. [Кинеловский С.А., Маевский К.К. // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2009. Т.4, вып. 4. С. 71—78.]



Коэффициент Грюнайзена в зависимости от сжатия для сплошной меди.

Расчет с учетом (9) – сплошная линия,
 Эксперимент : 1 – [БАБИЧЕВ 1991], 2-[ЗЕЛЬДОВИЧ 1966],
 3-[НОВИКОВА 1974], 4 -расчет из [КОРМЕР и д.р. 1962]

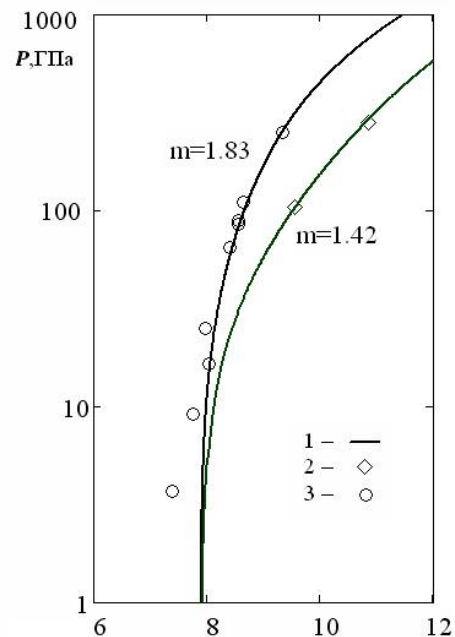
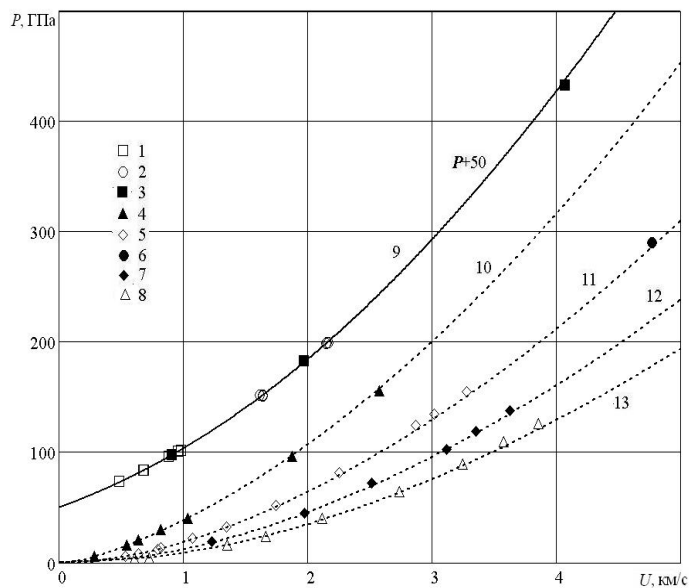


Сравнение расчетных и экспериментальных результатов для сплошного титана.

Расчеты: 1 – по модели (9)
 2 - $\Gamma = \text{const}$, 3 – $\Gamma(V, T)$ (МОЛОДЕЦ 1997), 4 – $\Gamma * p = \text{const}$.

Эксперимент: 5 -[WALSH et al., 1957], 6 – [ISBELL et al., 1968],
 7 – (АЛЬТШУЛЕР и др. 1981), 8 – [ТРУНИН и д.р. 1994]

Сравнение расчета с экспериментом для никеля и железа до пористости 2



Ударные адиабаты пористого никеля

($m = \rho_0 / \rho_{00}$ – исходная пористость экспериментальных образцов)

Расчеты по рассматриваемой модели с учетом (9): 9-13 с соответствующими экспериментами пористостями

Эксперименты: $m = 1$: 1 – [WALSH et al., 1957], 2 – [McQUEEN et al., 1960], 3 – (АЛЬТШУЛЕР и др. 1981), пористый: $m = 1.11$ – (ТРУНИН и др. 2001) - 4, $m = 1.4$ – 5 [ТРУНИН и др. 1989], 6 – [McQUEEN et al., 1970], $m = 1.72$ – 7, $m = 2$ – 8 [ТРУНИН и др. 1989].

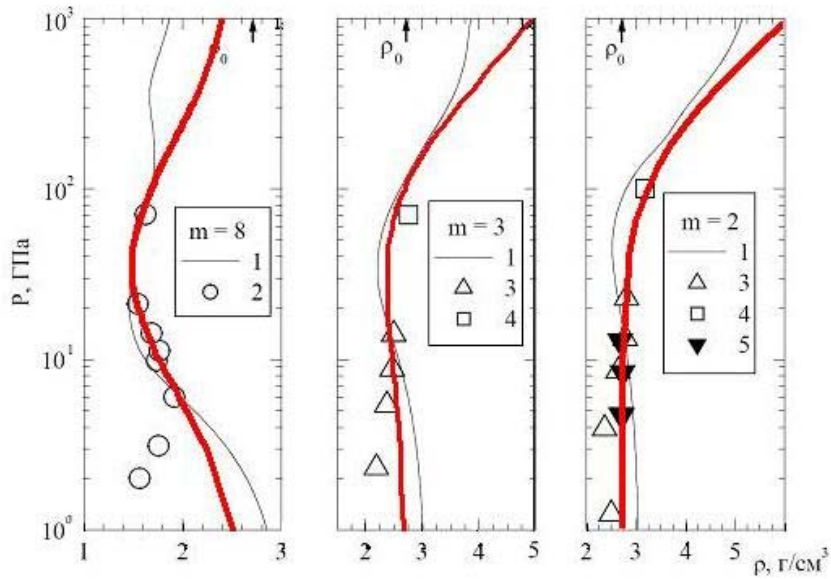
Ударные адиабаты пористого железа

Расчеты по рассматриваемой модели с учетом (9) с соответствующими экспериментами пористостями – 1

Экспериментальные данные: 2 - (АЛЬТШУЛЕР 1958) ($m = 1.42$), 3 – (ТРУНИН и др. 1989) ($m = 1.83$)

Учет влияния температуры при динамических нагрузках позволил описать эксперименты в существенно большем диапазоне как пористостей, так и давлений, чем предполагалось при разработке модели расчета смесей

Сравнение расчета ударных адиабат пористых алюминия и меди

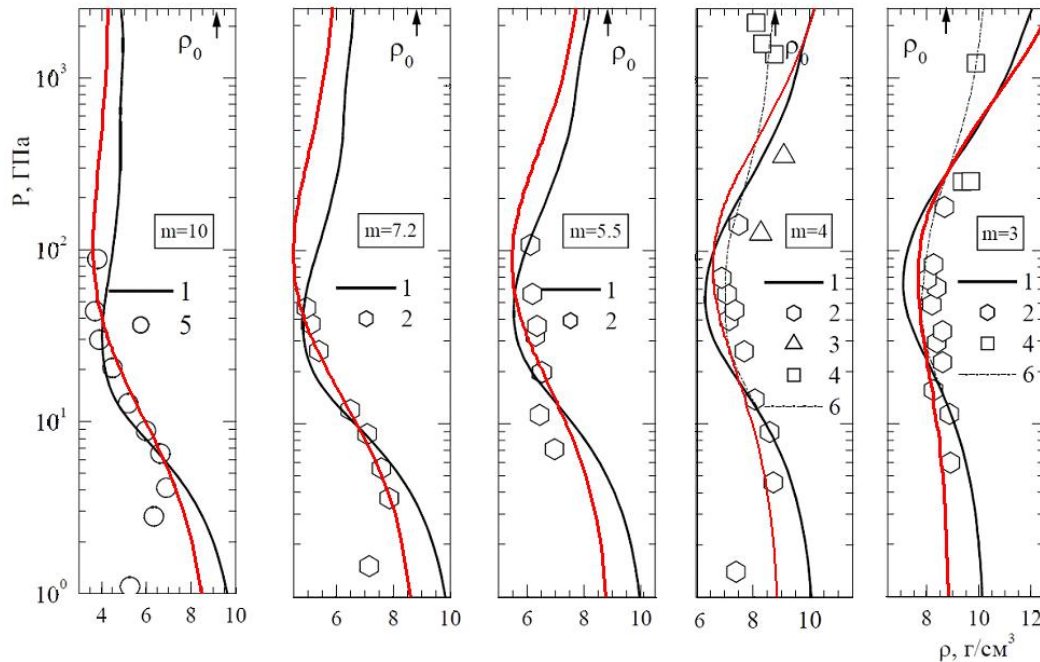


Сравнение производится наложением расчетов на рисунки приведенные в [Грязнов В.К, Иосилевский И.Л., Фортов В.Е., Термодинамика ударно-сжатой плазмы в квазихимическом представлении / Энциклопедия низкотемпературной плазмы, (под общей ред. В.Е. Фортова). Том приложений III-1 / Ред. А.Н. Старостин и И..Л. Иосилевский, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. сс.111-139]

Ударные адиабаты пористого алюминия.

Расчеты: 1 – Химическая модель (код SANA-IV) (ФОРТОВ В.Е. и др. 2000)
 Расчеты с учетом (9) – цветные линии с соответствующими пористостями

Экспериментальные данные: 2 - (ТРУНИН и др. 2001), 3 – (БАКАНОВА и др. 1974), 4 – (КОРМЕР и др. 1962), 5 – (VAN THIEL, 1977)



Ударные адиабаты пористой меди.

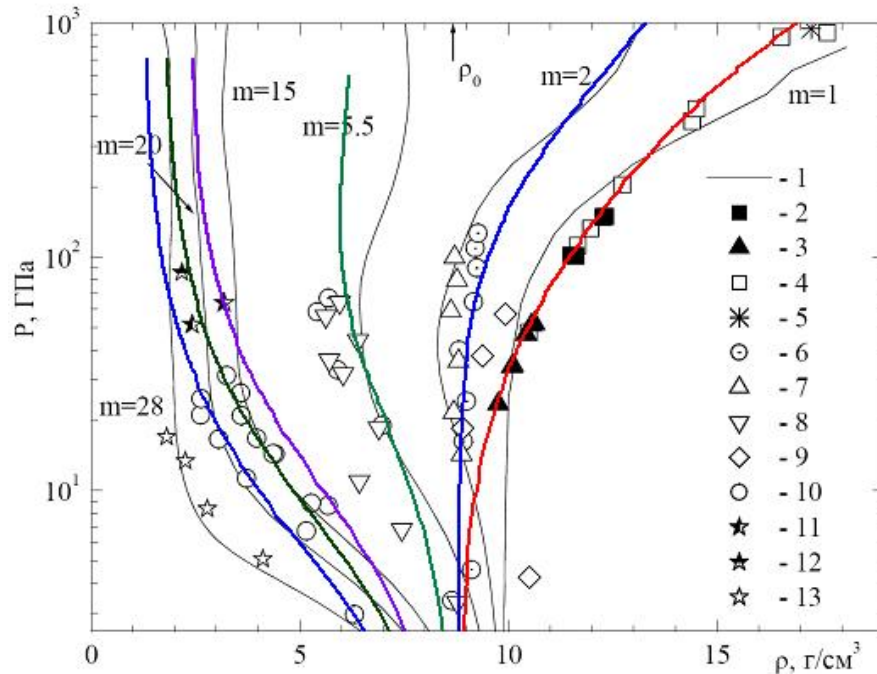
Расчеты: 1 – Химическая модель (код SANA-IV) (ФОРТОВ В.Е. и др. 2000)
 расчеты с учетом (9) – цветные линии с соответствующими пористостями
 6 – расчет с измененными атомными и ионными радиусами (ГРЯЗНОВ и др. 1982)

Экспериментальные данные: 2 - (ТРУНИН и др. 1989), 3 – (КОРМЕР и др. 1962), 4 – (ЗУБАРЕВ и др. 1978), 5 – (ЖЕРНОКЛЕТОВ и др. 1998).

Сравнение расчета ударных адиабат пористого никеля и железа

Сравнение производится наложением расчетов на рисунки приведенные в [Грязнов В.К, Иосилевский И.Л., Фортов В.Е., Термодинамика ударно-сжатой плазмы в квазихимическом представлении / Энциклопедия низкотемпературной плазмы, (под общей ред. В.Е. Фортова). Том приложений III-1 / Ред. А.Н. Старостин и И.Л. Иосилевский, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. сс.111-139].

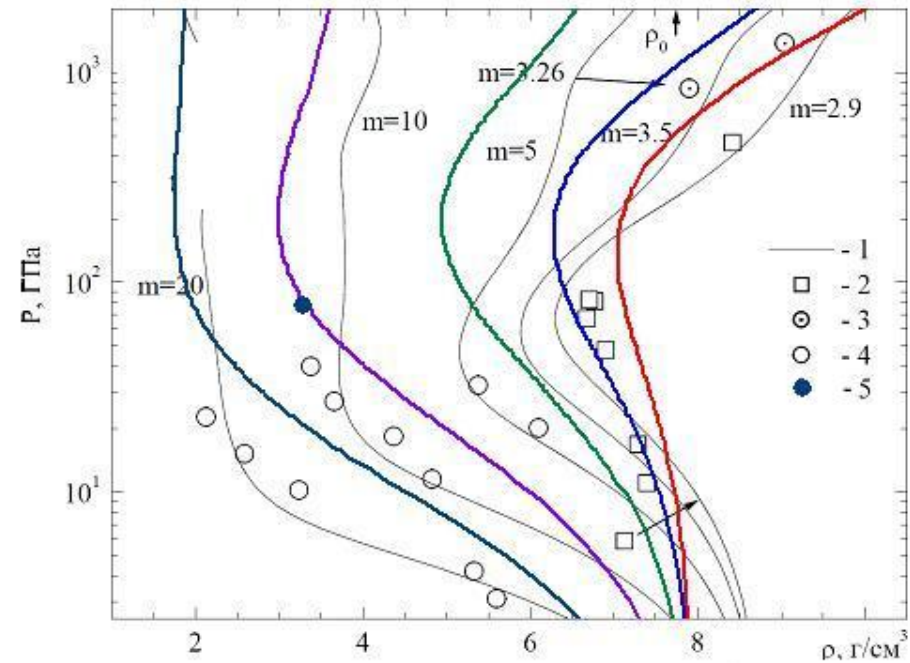
для железа добавлена точка при $m=10$ (ТРУНИН и др. 1997)



Ударные адиабаты пористого никеля

Расчеты: 1 – Химическая модель (код SANA-IV) (ФОРТОВ В.Е. и др. 2000)
Расчеты с учетом (9) – цветные линии с соответствующими пористостями

Экспериментальные данные: 2 - (McQUEEN and MARSH, 1960), 3 - (WALSH et al., 1957), 4 - (АЛЬТШУЛЕР и др. 1962), 5 – (КОРМЕР и др. 1962), 6 - (ТРУНИН и др. 1989) ($m=2$), 7 - (ТРУНИН и др. 1989) ($m=2.35$), 8 – (ТРУНИН и др. 1989) ($m=5.62$), 9 – (АЛЕКСЕЕВ и др. 1971), 10 – (ТРУНИН, СИМАКОВ, 1993), 11 - (ЖЕРНОКЛЕТОВ и др.1998), 12 (ТРУНИН и др. 2001) ($m=20$), 13 - (ТРУНИН и др. 2001) ($m=28$)



Ударные адиабаты пористого железа

Расчеты: 1 – Химическая модель (код SANA-IV) (ФОРТОВ В.Е. и др. 2000).
Расчеты с учетом (9) – цветные линии с соответствующими пористостями

Экспериментальные данные: 2 - (ТРУНИН и др. 1989) ($m=2.9$), 3 – (ТРУНИН и др. 1989), 4 – (ЖЕРНОКЛЕТОВ и др. 1998). 5 – (ТРУНИН и др. 1997)

Сравнение расчета с экспериментом для изэнтроп разгрузки меди и алюминия

Система уравнений, описывающая изменение термодинамических величин вдоль изоэнтропы, включает уравнение изоэнтропы $dE = -PdV$ и УС. Уравнение изоэнтропы, проходящей через точку P_1, P_{1T}, σ_1 на ударной адиабате, где σ – отношение плотностей, имеет вид

$$P = P_x(\sigma) + P_{1T} * \left(\frac{\sigma}{\sigma_1} \right)^{\Gamma+1} \quad (10)$$

Приращение массовой скорости Δu при изоэнтропическом расширении из начального состояния до давления P равно

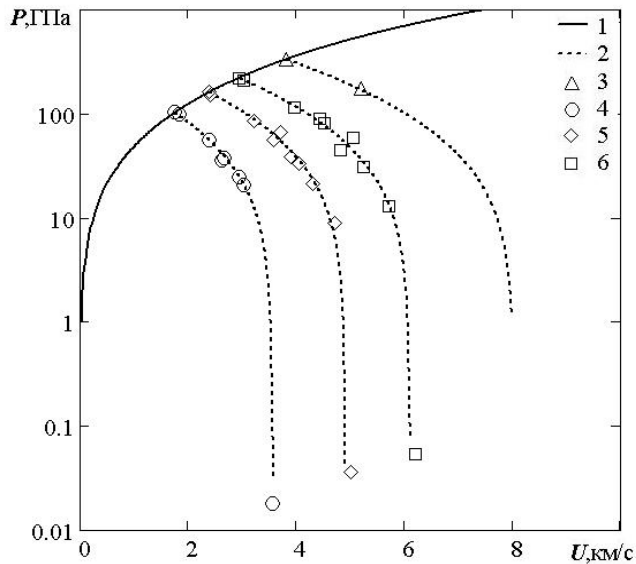
$$\Delta u = \int_{P_1}^P \sqrt{-dPdV}$$

где давление берется вдоль изоэнтропы по формуле (10).

Полная скорость частиц предварительно сжатого ударной волной вещества .

$$u = u_1 + \Delta u$$

(Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. / Под ред. Жерноклетова М.И. – Саров. 2003)

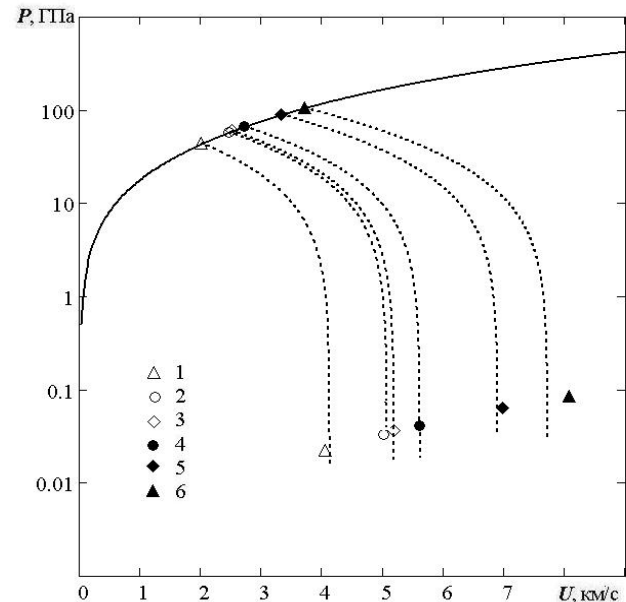


Ударные адиабаты и кривые расширения сплошной меди

Расчет: с учетом (9): 1 – Ударная адиабата,

2 – изоэнтропы разгрузки,

Эксперимент: 3 – разгрузка из точки с давлением 328.8 ГПа [Nellis 2003], 4 - 6 – с давлением 102.0, 159.8, 219.1 ГПа [ЖЕРНОКЛЕТОВ и др. 1984].

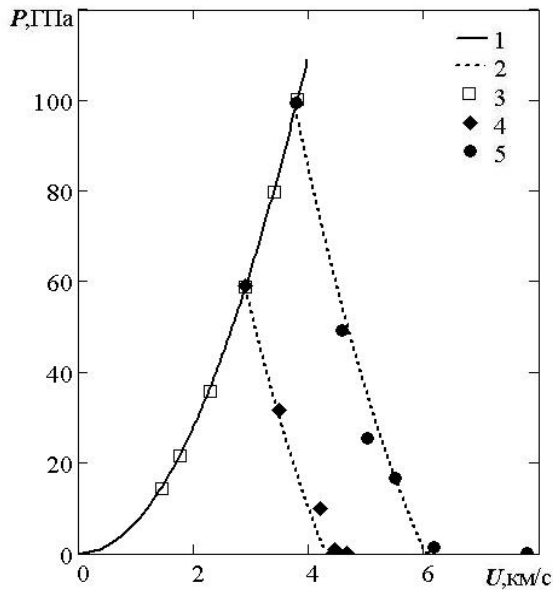


Ударные адиабаты и кривые расширения сплошного алюминия.

Расчет: с учетом (9): сплошная линия – ударная адиабата, пунктир – изоэнтропы.

Эксперимент: разгрузка из точки с давлением 1- 44, 2 – 58, 3 – 60, 4 – 67, 5 – 89, 6 – 105 ГПа [БАКАНОВА и др 1983].

Сравнение расчета с экспериментом для пористых углерода и никеля



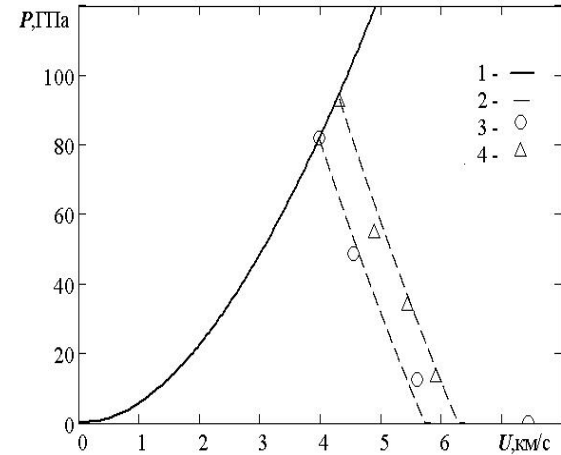
Расчеты для пористого никеля $m = 2.3$

Расчет с учетом (9): 1 – ударная адиабата, 2 – изоэнтропы разгрузки из соответствующих эксперименту точек на УА

Эксперимент: 3 - [ТРУНИН и др. 1989],
4,5 – расширение с P 59.0 ГПа, 99.4 ГПа
[ГУДАРЕНКО и д.р.2000].

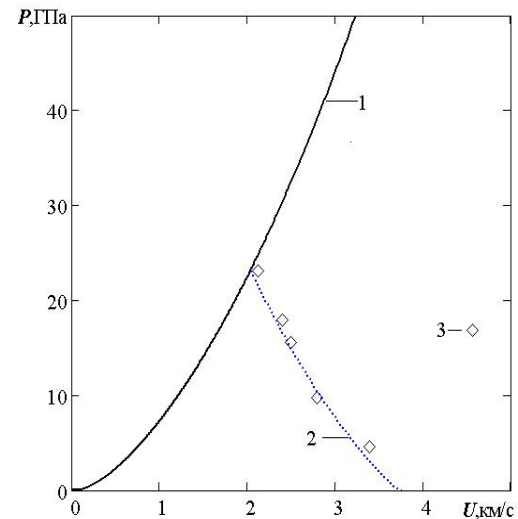
Расчеты для пористого углерода $m = 1.06$

Расчет с учетом (9): 1 – ударная адиабата, 2 – изоэнтропа разгрузки
Эксперимент 3 - [ТРУНИН и др. 2001] – расширение с P 23.1 ГПа



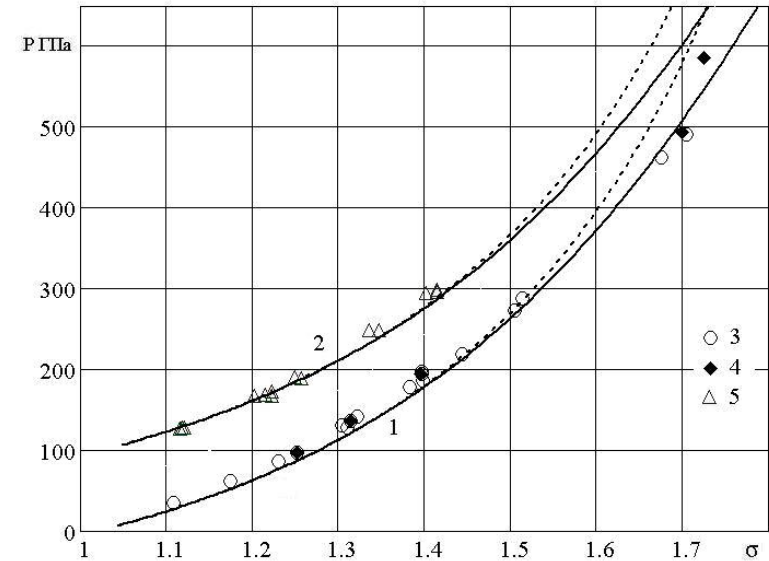
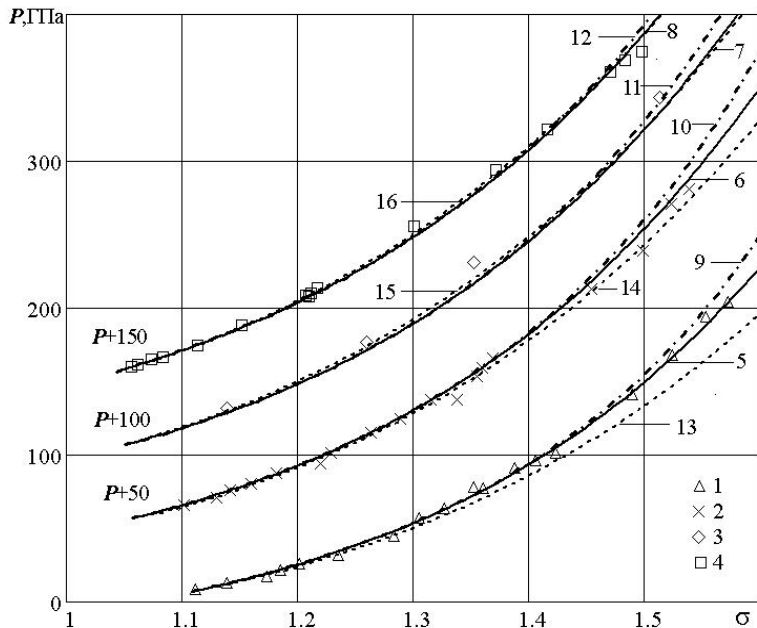
Расчеты для пористого углерода $m = 1.03$

Расчет с учетом (9): 1 – ударная адиабата, 2 – изоэнтропы разгрузки из соответствующих эксперименту точек на УА
Эксперимент [ТРУНИН и др. 2001] – 3 - расширение с P 82.0 ГПа, 4 - 93.3 ГПа



Сравнение расчета с экспериментом для двойных и тройных пористых смесей

Дополняя соответствующие уравнения, построены ударные адиабаты и для большего количества компонентов, в частности для тройных сплавов и смесей.



Расчет для УА смеси вольфрама и меди (элконит).

1 – 4 - эксперименты (McQUEEN et al., 1970), 5 – 8 - расчет с учетом (9), 1, 5 – пористость $m = 1.068$; 2, 6 - $m = 1.022$; 3, 7 - $m = 1.019$; 4, 8 - $m = 1.015$

9-12 – расчет с $\Gamma = const$, 13-16 – расчет в аддитивном приближении

Расчет для УА смеси вольфрама, меди и никеля.

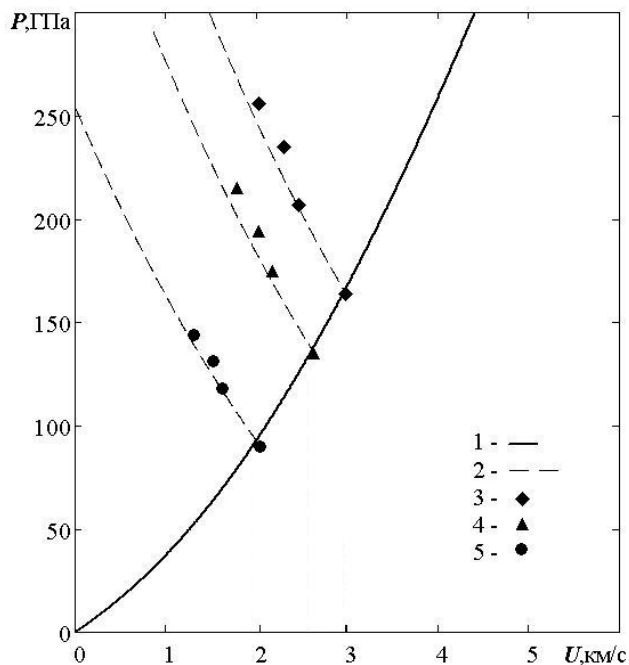
Расчет с учетом (9): 1 – ударная адиабата для смеси wt% W(90)Ni(6)Cu(4) $m = 1.02$, 2 – смесь wt% W(90)Ni(7.5)Cu(2.5) $m = 1.05$, пунктир – расчет при $\Gamma = const$

Эксперимент: 3 – [ISBELL 1968], 4 – [M. van THIEL 1977]; 5 – [M. van THIEL 1977].

Сравнение расчета с экспериментом для двойного сжатия

Предложенная модель хорошо описывает результаты экспериментов по двойному сжатию ударными волнами сплошных и пористых материалов и смесей.

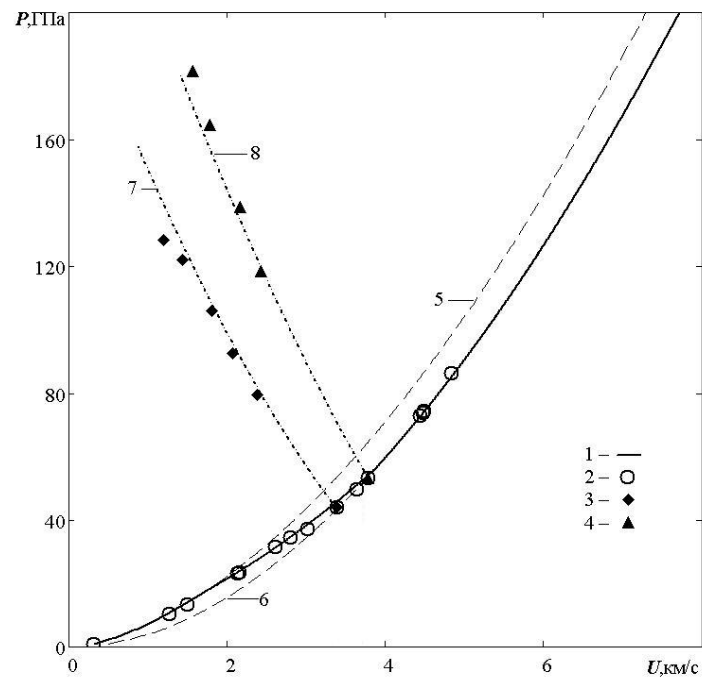
Рассчитаны ударные адиабаты с учетом фазового перехода углерода графит-алмаз. В области фазового перехода производится расчет смеси 2-х фаз углерода до полного перехода графита в алмаз.



Ударная адиабата и адиабата двукратного сжатия цинка

Расчет по предлагаемой модели с учетом (9):
1 – ударная адиабата, 2 – двукратное сжатие,

Эксперимент: 3 – 5 - данные [ТРУНИН, СИМАКОВ 1993]



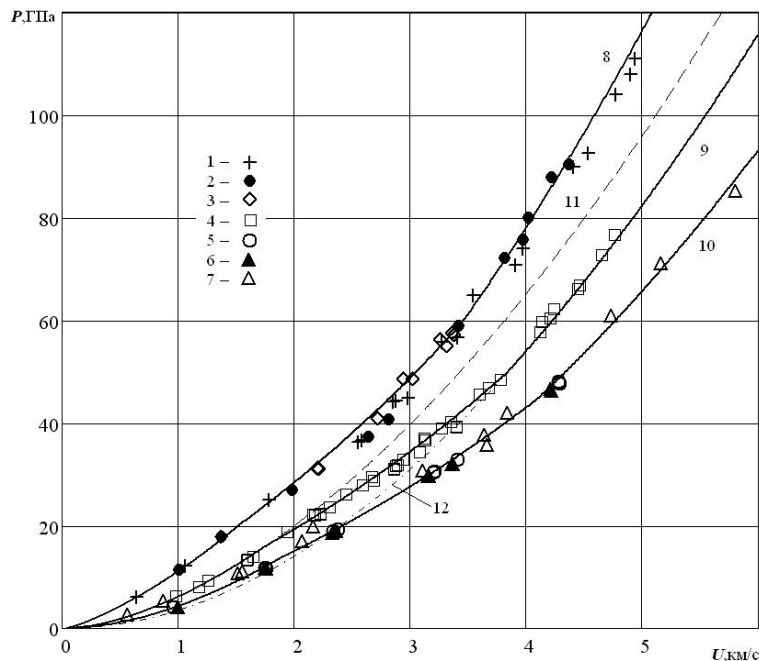
Ударная адиабата и адиабата двукратного сжатия пористого графита

Расчет по предлагаемой модели с учетом (9):
1 – ударная адиабата, 2 – двукратное сжатие, 5 – УА графита,
6 – УА алмаза, 7 – 8 - двойное сжатие

Эксперимент: 2 – 4 - данные [ТРУНИН и др. 2001] $m=1.21$.

Сравнение расчета с учетом фазового перехода графит - алмаз

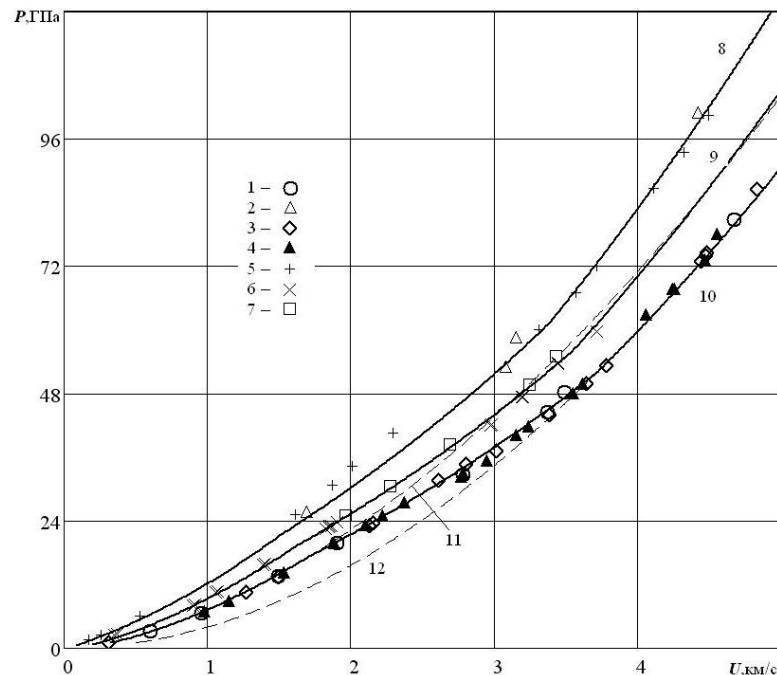
При описании полиморфного фазового перехода начало и окончание процесса определяется из соответствия экспериментальным данным.



Ударные адиабаты пористого графита

Расчет по предлагаемой модели с учетом (9):
Сплошные линии – ударная адиабата соответствующей эксперименту пористости, 11 - расчет по графиту $m=1.28$ и пористому алмазу той же плотности – 12.

Эксперимент – 1, 7 [GUST 1980], 2, 4, 5, 6 – [MARSH 1980], 3 – [M. van THIEL 1977], расчет 8 – $m=1.05$, 9 – $m=1.28$, 10 – $m=1.47$,



Ударные адиабаты пористого графита

Расчет по предлагаемой модели с учетом (9):
Сплошные линии – ударная адиабата соответствующей эксперименту пористости, 11 - расчет по графиту $m=1.21$ и пористому алмазу той же плотности – 12.

Эксперимент 1, 2 – [ПАВЛОВСКИЙ и др. 1966]; 3, 5 – [ТРУНИН и др. 2001]; 4, 6 – [MARSH 1980 8]; 7 – [ДРЕМИН и др. 1968]; 8 - расчет $m=1.019$, 9 - $m=1.11$, 10 – $m=1.21$, 11- расчет по графиту $m=1.21$ и пористому алмазу той же плотности – 12.