

чих очагов в системах окислитель — горючее при механических и ударно-волновых воздействиях одинаковым образом определяются свойствами компонентов и способностью их к физико-химическому взаимодействию.

Поступила в редакцию  
12/1 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Карпухин, В. К. Боболев. ФГВ, 1967, 3, 3.
2. И. А. Карпухин, В. К. Боболев. ФГВ, 1967, 3, 4.
3. И. А. Карпухин, В. К. Боболев, В. А. Теселкин. ФГВ, 1971, 7, 2.
4. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Инициирование твердых ВВ ударом. М., «Наука», 1968.
5. А. В. Дубовик. Канд. дис. ИХФ АН СССР, 1966.
6. Л. Г. Болховитинов. Докл. АН СССР, 1959, 126, 3220.
7. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев и др. ФГВ, 1975, 11, 3.
8. В. В. Болдырев. Влияние дефектов в кристаллах на скорость термического разложения твердых веществ. Томск, Изд-во ТГУ, 1963.
9. Г. Б. Манелис, Ю. И. Рубцов, А. В. Раевский. ФГВ, 1970, 6, 1.
10. Г. А. Адагуров, И. А. Карпухин и др.— В сб.: Тезисы V Всесоюзной конференции по кинетике реакций в твердом теле. М., «Наука», 1974.
11. A. K. Galway, P. W. Jacobs. Proc. Roy. Soc., 1960. A254, 455.
12. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков и др. ФГВ, 1968, 4, 2.
13. Л. Н. Акимова, Л. Н. Стесик, А. Я. Апин. ФГВ, 1967, 3, 3.
14. А. Ф. Беляев.— В сб.: Вопросы теории ВВ. М., Изд-во АН СССР, 1947.
15. Л. Н. Акимова, Л. Н. Стесик. ФГВ, 1976, 12, 2.

#### О ВЗРЫВЕ НА ВЫБРОС В ПЕСКЕ

В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич, А. Р. Романов

(Москва)

Взрыв на выброс в песке представляет интерес при различного рода строительных работах в условиях песчаных засушливых земель (пустынь), при модельных экспериментальных исследованиях взрыва в лабораторных условиях, а также при оценке относительной работоспособности различных ВВ по методу воронкообразования.

Опыты показали, что взрывы на выброс в сухом песке обладают рядом особенностей, которые не укладываются в рамки общепринятых представлений о взрыве на выброс в грунтах естественного залегания. Лабораторные эксперименты проводились в кварцевом песке с насыпной плотностью 1,5 г/см<sup>3</sup>, влажностью менее 0,5%, пористостью 40% с зарядами тэна массой 0,8 г (1,12 г ТНТ или 1120 кал). После каждого взрыва тщательно (с точностью до 1%) замерялись все геометрические размеры воронки выброса до первоначального уровня грунта. Число взрывов на одной глубине изменялось от 3 до 8. Все экспериментальные данные приведены в табл. 1. Средняя погрешность всех величин не превышает 15%. В табл. 1 приведены величины расчетных расходов ВВ ( $q, q_1$ ), вычисленных по формуле М. М. Борескова [1, 2]

$$E = qW^3(0,4 + 0,6n^3) \quad (1)$$

и Г. И. Покровского [3, 4]

$$E = 0,55q_1W^3(1 + n^2)^{3/2}. \quad (2)$$

Таблица 1

$W \cdot 10^3$ , м	$R \cdot 10^3$ , м	$H \cdot 10^3$ , м	$V \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup>	$n$	$q$ , кг/м <sup>3</sup>	$q_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\frac{H}{W(n-n_0)^{2/3}}$	$\frac{q_1}{f_1(n)}$	$V/E$ , м <sup>3</sup> /10 <sup>3</sup> ккал	
									экспери- мент	расчет
20	152	63	1,8	7,6	0,55	0,57	0,96	0,32	1,61	1,56
30	173,5	74	2,8	5,8	0,38	0,38	0,97	0,32	2,45	2,40
40	179,5	80	3,1	4,5	0,40	0,32	1,00	0,32	2,73	2,76
50	174	75	2,8	3,5	0,34	0,33	1,01	0,32	2,50	2,54
60	163	62	2,2	2,7	0,43	0,40	1,03	0,36	1,97	1,90
65	142	42	1,3	2,2	0,62	0,54	1,03	0,45	1,13	1,44

Примечание.  $W$  — глубина заложения заряда,  $R$  — радиус воронки,  $H$  — глубина воронки,  $n=R/W$  — показатель выброса,  $V$  — объем воронки.

В этих выражениях  $E$ -энергия ВВ в 10<sup>3</sup> ккал соответствует массе ВВ в килограммах ТНТ. Числовой множитель в (2) выбран из условия совпадения  $q$  и  $q_1$  в области максимального объема выброшенного грунта. Формулы (1) и (2) примерно с одинаковой точностью описывают экспериментальные данные. Формула (2) получается из довольно простых физических соображений [4]. Предполагается, что радиус зоны критического деформирования (например, предельных сдвигов) грунта  $a_m$  не зависит от глубины заложения заряда и пропорционален радиусу заряда  $a_0$

$$a_m/a_0 = k, \quad (3)$$

причем постоянная  $k$  зависит от физико-механических свойств грунта и вида ВВ. Далее предполагается, что край воронки определяется как пересечение сферы радиуса  $a_m$  с центром в середине заряда со свободной поверхностью так, что

$$u = \frac{R}{W} = \frac{\sqrt{a_m^2 - W^2}}{W}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) с учетом очевидного соотношения  $E = \frac{4\pi}{3} a_0^3 \rho \varepsilon$ , где  $\rho$  — плотность ВВ,  $\varepsilon$  — удельная энергия, (2) переписывается в виде

$$E = \frac{4\pi\rho\varepsilon}{3} \cdot \frac{W^3 (1+n^2)^{3/2}}{k^3}. \quad (5)$$

Величина  $a_m$  пропорциональна конечному или максимальному радиусу полости  $a_k$ :

$$a_m = \alpha a_k.$$

Вводя показатель протреливаемости

$$\Pi = \frac{a_k^3}{\rho a_0^3} = \frac{k^3}{\rho \alpha^3},$$

можно переписать (5) в виде

$$E = \frac{4\pi}{3} \frac{\varepsilon}{\alpha^3 \Pi} W^3 (1+n^2)^{3/2}.$$

Радиус зоны критического деформирования  $a_m$  — понятие весьма условное, впрочем, такое же, как и радиус зоны разрушения, широко применяемый в механике взрыва. Тем не менее ясно, что при малых

глубинах заложения происходит выброс в атмосферу газообразных продуктов детонации, обладающих значительным запасом энергии. Это должно приводить к уменьшению величины  $a_m$ , и этим объясняется расхождение расчетных и экспериментальных данных для  $q$  и  $q_1$  при малых значениях  $W$  (см. табл. 1). При больших значениях  $W$  (см. табл. 1) расхождение, по-видимому, объясняется влиянием силы тяжести: частицы грунта на краях воронки оторвались от основной массы, но имеют слишком малую скорость, чтобы быть выброшенными за ее пределы. В пользу этого предположения свидетельствует также тот факт, что здесь глубина воронки становится меньше глубины заложения. В исследованном диапазоне глубина воронки связана с глубиной заложения соотношением

$$H = W(n - n_0)^{3/2}, \quad n_0 = 1,7. \quad (6)$$

Это выражение существенно отличается от аналогичных соотношений, приводимых, например, в [1, 2]. Формула (6) справедлива с погрешностью, не превышающей 4% (см. табл. 1).

Чтобы подправить значения  $q$  и  $q_1$  на концах интервала, можно ввести эмпирическую функцию  $f_1(n)$ :

$$f_1(n) = 1 + (n/n_1 - 1)^2, \quad n_1 = 4. \quad (7)$$

Здесь  $n_1$  — показатель выброса, при котором относительный объем воронки имеет максимальное значение (для сухого песка  $n_1 = 4$ ). К чему приводит эта поправка, видно из табл. 1. В формулах (1) и (2) функция  $f_1(n)$  должна стоять в качестве множителя

$$E = qW^3 f(n) \cdot f_1(n). \quad (8)$$

Наконец, для еще более полного описания воронки выброса следует заметить, что ее форма отличается от конической. Таким образом, объем воронки следует вычислять по формуле

$$V = \beta R^2 H = \beta n^2 W^3 (n - n_0)^{2/3},$$

где  $\beta$  — коэффициент формы. В данном случае  $\beta = 1,2$  для опытов, приведенных в табл. 1. Из последних двух выражений получаем

$$V/E = \beta n^2 (n - n_0)^{2/3} / q f(n) f_1(n). \quad (9)$$

Добавив к этому выражению (8)

$$E = 0,55 q_1 W^3 (1 + n^2)^{3/2} [1 + (n/n_1 - 1)^2], \quad (10)$$

приходим к системе двух уравнений, исключая из которых  $n$ , можно получить зависимость

$$V/E = F(W/E^{1/3}). \quad (11)$$

Сравнение экспериментальных и расчетных величин  $V/E$  приведено в табл. 1 и графически изображено на рис. 1. Заметное расхождение имеется только в точке максимального заглубления. Таким образом, для адекватного описания воронки выброса в сухом песке потребовалось кроме использования формул Борескова-Покровского (1), (2) введение трех дополнительных параметров: коэффициента формы  $\beta$  и характеристических показателей выброса  $n_0$  и  $n_1$ . Эти три величины зависят только от свойства грунта. Для сухого песка максимальный объем воронки выброса получается при  $n_1 = 4$ ; обычно для грунтов естественного залегания эта величина близка к  $1 \div 2$ .

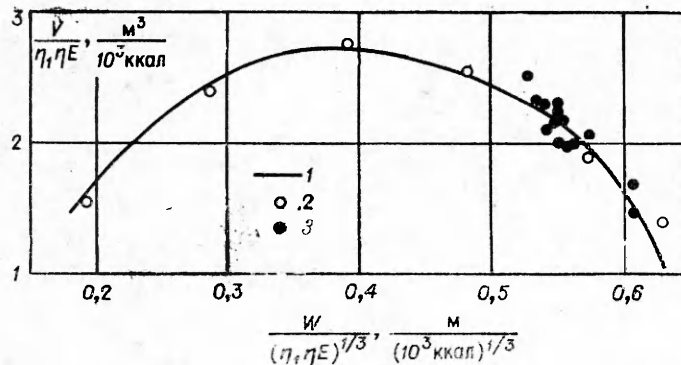


Рис. 1. Зависимость относительного объема воронки выброса от приведенной глубины заложения.

1 — экспериментальная кривая для взрыва заряда тэна 0,8 г в сухом насыщенном песке,  $\eta=1$ ,  $\eta_1=1$ ; 2 — расчет по (13) — (15),  $\eta=1$ ,  $\eta_1=1$ ; 3 — экспериментальные данные для уплотненного песка с влажностью 6% [9];  $\eta_1=0,41$ ,  $0,915 \leq \eta \leq 1,58$ .

Для глубины воронки в [1, 5] предлагаются следующие формулы:

$$H=0,5nW, \quad H=W(0,45n+0,25).$$

Нетрудно убедиться, что они хуже описывают экспериментальные результаты, чем (6). Коэффициент формы для несвязных грунтов изменяется от 1 до 1,25. Для связных грунтов, например глин, когда форма воронки близка к параболической, величина  $\beta$  приближается к 1,5.

Применимость формул Борескова—Покровского с учетом сделанных поправок свидетельствует о принципиальной возможности моделирования натуральных взрывов с помощью малых зарядов ВВ. Это замечание необходимо сделать по следующей причине. При экспериментальном исследовании взрывов зарядов от 0,8 до 10 г тэна [6—8] обнаружено, что на начальной стадии развития взрыва существенное значение имеют процессы теплообмена продуктов детонации с окружающей средой. Тепловые потери настолько велики, что максимальное значение кинетической энергии грунта составляет всего 7% от общего количества потенциальной энергии ВВ (этот максимум достигается в момент времени, когда радиус полости увеличивается примерно в 2,4 раза, а радиус волны сжатия находится на расстоянии, равном пяти начальным радиусам газового пузыря). Результаты исследования массовых скоростей позволили для разных типов ВВ ввести так называемый тэновый эквивалент

$$\eta=9,5(m/E)^{0,6}, \quad m=M/22,4,$$

где  $E$  — энергия ВВ;  $m$  — масса продуктов, моль;  $M$  — объем газообразных продуктов, отнесенный к нормальным условиям, л. В работах [7, 8] такой подход позволил проанализировать имеющийся весьма обширный материал по измерению работоспособности ВВ по методу свинцовой бомбы (проба Трауцля); оказалось, что работоспособность ВВ, определяемая как увеличение объема  $\Delta V$  свинцовой бомбы, связана единой функциональной зависимостью не с энергией ВВ, а с величиной  $\eta E$ . Поскольку образование воронки выброса также связано с работоспособностью ВВ, имеет смысл посмотреть, как повлияет на предыдущие результаты изменение вида ВВ. Здесь, однако, возникает затруднение, связанное с тем, что в литературе почти отсутствуют систематические данные по взрывам в сухих несвязанных (насыпных) грунтах, а любое изменение влажности и плотности песка приводит к существенному изменению удельного расхода ВВ, геометрических размеров и форм воронки.

Таблица 2

Вид ВВ	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\varepsilon, \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	$\Delta V, \text{см}^3$	$\eta\varepsilon, \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	$n$	$V \cdot 10^2, \text{м}^3$
Аммонит № 8 . . . . .	1,1	690	240	1090	2,10	3,29
Калитол . . . . .	1,15	1050	230	1060	2,18	3,65
Победит ВП-2 . . . . .	1,3	910	320	1260	2,33	5,32
Аммонит 6ЖВ . . . . .	1,0	1030	360	1350	2,40	5,33
Тротил . . . . .	1,0	1030	285	1190	2,40	5,45
Динамит 62% . . . . .	1,45	1270	390	1390	2,44	5,67
Аммонит пресс. СК-2 . . . . .	1,55	1160	420	1430	2,34	5,81
Аммонал ВА-4 . . . . .	1,0	1176	430	1450	2,53	6,26
Аммонит порошок СК-2 . . . . .	1,1	1166	420	1430	2,50	6,33
Гексонит 30% . . . . .	1,25	2200	420	1430	2,45	6,58
Аммонит пресс. СК-1 . . . . .	1,45	1290	450	1470	2,46	6,64
Аммонит СК-1 порошок . . . . .	1,0	1290	450	1470	2,57	6,92
Гексоген . . . . .	1,0	1270	475	1510	2,54	6,47
Аммонал 80/20 . . . . .	0,9	1683	500	1540	2,7	7,97

Примечание.  $\rho$  — плотность заряжения ВВ,  $\varepsilon$  — калорийность,  $\Delta V$  — работоспособность по Траудю.

В работе [9] представлены результаты испытаний различных видов ВВ на работоспособность по воронкообразованию. Взрывы производились в насыпном песке с влажностью  $\sim 6\%$ , утрамбованном тяжелым катком до плотности  $1,78 \text{ г/см}^3$ . Масса ВВ во всех случаях была равна 50 г. Глубина заложения, отсчитываемая от середины заряда,  $\sim 17 \text{ см}$  с небольшими вариациями, зависящими от плотности ВВ. Основные результаты опытов приведены в табл. 2. По последним данным, используя результаты работы [8], определялись значения тэнового эквивалента  $\eta$  и величины произведений  $\eta E$ .

Результаты обработки этих данных показаны на рис. 2. Видно, что введение  $\eta$  существенно уменьшает разброс экспериментальных точек. Поскольку грунт в данном случае не сильно отличается от лабораторного сухого песка, можно ввести поправку на грунт — «грунтовый эквивалент»  $\eta_1$ , равный отношению расчетных удельных расходов для насыпного и утрамбованного песка. В данном случае  $\eta_1 = 0,41$ . Результаты этого пересчета показаны на рис. 1. Видно, что этот простой пропорциональный пересчет позволяет идентифицировать экспериментальные данные по воронкам выброса для широкого класса ВВ и для грунтов, не слишком сильно отличающихся по физико-механическим свойствам.

Рассмотрим изменение результатов при переходе к грунтам естественного залегания. Возьмем экспериментальные данные для аллювия и лесса [10]. Для сравнения воспользуемся также и методикой обра-

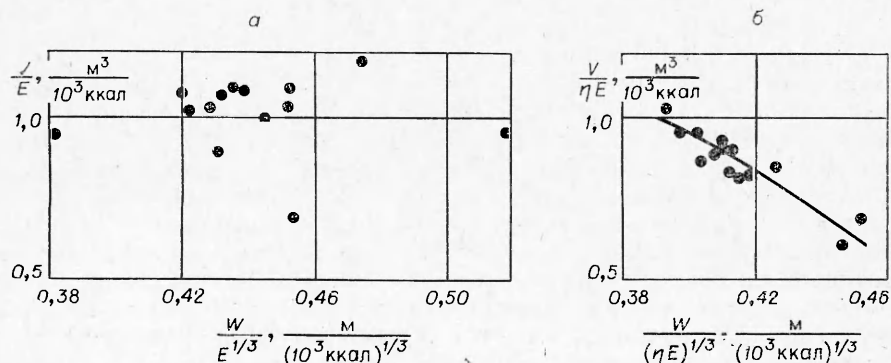
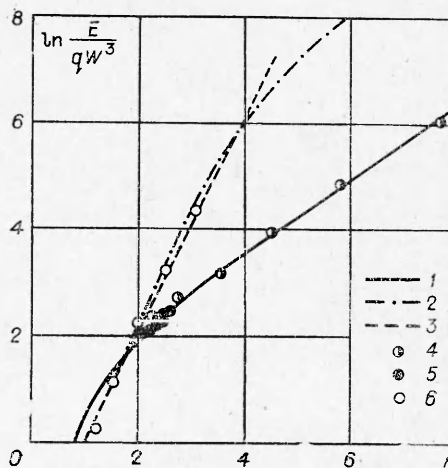


Рис. 2. Зависимость относительного объема воронки выброса от приведенной глубины заложения для разных видов ВВ, без учета (а) и с учетом тэнового эквивалента (б).

Рис. 3. Зависимость приведенной энергии взрыва от показателя выброса.

1, 2 — расчет при  $q=1$  кг/м<sup>3</sup>,  $n_1=4$  и  $n_1=1$  соответственно; 3 — эксперимент [10],  $q=1$  кг/м<sup>3</sup>; 4 — эксперимент с тэном в сухом песке,  $q=0,38$  кг/м<sup>3</sup>; 5 — эксперимент [9] с учетом тэнового эквивалента,  $q=1,4$  кг/м<sup>3</sup>; 6 — средние экспериментальные данные по аллювию и лессу [10],  $q=2,1$  кг/м<sup>3</sup>.



ботки этих данных, предложенной в [10]. Для несвязанных грунтов естественного залегания максимальный относительный объем воронки выброса достигается при  $n \approx 1$ , так что поправочная функция (7) имеет вид

$$f_1(n) = 1 + (n-1)^2. \quad (12)$$

Следуя [10], изобразим графически экспериментальные данные в координатах  $\ln(E/qW^3)$ ,  $n$ . Из формулы Борескова — Покровского в виде (11) получаем

$$\ln(E/qW^3) = \ln[f(n) \cdot f_1(n)],$$

где  $f(n)$  выражается в виде (1) или (2) независимо от вида грунта, а  $f_1(n)$  имеет вид (7) или (12) соответственно для насыпного песчаного грунта и грунта естественного залегания. Соответствующие им кривые изображены на рис. 3, 1, 2. Здесь же приведены экспериментальные данные, рассмотренные выше, а также усредненные экспериментальные данные из [10]. На рис. 3, 3 дана зависимость, полученная в [10] на основе моделирования взрывов на выброс при помощи лабораторной вакуумной установки [11, 12]. Функция  $f(n)$  в расчетных кривых выбрана в виде (1). Экспериментальные точки для различных ВВ изображены с учетом их тэнового эквивалента, т. е. вместо  $E$  взято  $\eta E$ .

Неплохое совпадение расчетных и опытных данных позволяет сделать вывод эквивалентности традиционных формул типа формулы Борескова — Покровского (1), (2) с поправочными коэффициентами (7), (12) по формулам типа

$$n = a + b \ln(E/qW^3), \quad a, b = \text{const},$$

предложенными в [10—12].

С другой стороны, различие в угловых коэффициентах для грунтов с различными физико-механическими свойствами показывает, что моделирование натуральных взрывов в естественных грунтах при помощи лабораторных взрывов в насыпных грунтах с использованием тех же ВВ невозможно принципиально, если иметь целью подобие профилей воронок выброса. В каждом конкретном случае потребуется довольно сложный пересчет от эксперимента к натуре.

Для лабораторного моделирования наиболее подходит сухой песок, так как его свойства не меняются от опыта к опыту в отличие от влажного песка, содержание воды в котором уменьшается вследствие ее испарения в каждом опыте. Поскольку «прочность» песка очень мала, то и ВВ должно быть маломощным. Именно этот принцип осуществляется при моделировании крупных взрывов, когда ВВ заменяется пузырем сжатого газа [10—12].

Поступила в редакцию  
18/IV 1978

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Ассонов, М. М. Докучаев, И. М. Кукунов. Буровзрывные работы. М., Госстройиздат, 1960.
2. Б. Н. Кутузов, Ю. К. Валухин и др. Проектирование взрывных работ. М., «Недра», 1974.
3. Г. И. Покровский.— В сб.: Действие взрыва в грунте и расчет зарядов. Под ред. С. И. Сильвестровича. М., Промстройиздат, 1957.
4. В. М. Кузнецов. Тр. МФТИ. № 3. М., Оборонгиз, 1959.
5. Технические правила ведения взрывных работ в энергетическом строительстве. Под ред. Б. И. Каменки. М., «Энергия», 1972.
6. В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1977, 13, 5.
7. В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1977, 13, 2.
8. К. Е. Губкин, В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ПМТФ, 1978, 2.
9. Л. И. Барон, С. Г. Левчик, Н. К. Терметчиков.— В сб.: Взрывное дело, № 44/1. М., «Недра», 1960.
10. В. Н. Родионов, А. Н. Ромашов и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
11. М. А. Садовский, В. В. Адушкин, В. Н. Родионов. Моделирование крупных взрывов на выброс. ДАЛ СССР № 6. М., 1966.
12. В. В. Адушкин, С. Г. Кривошеев.— В сб.: Взрывное дело, № 73/30, М., «Недра», 1974.

## ОБОБЩЕННЫЕ УДАРНЫЕ АДИАБАТЫ И НУЛЕВЫЕ ИЗОТЕРМЫ ЭЛЕМЕНТОВ

*В. Ф. Анисичкин*

*(Новосибирск)*

К настоящему времени разными авторами получены адиабаты Гюгио около восьмидесяти элементов периодической системы Д. И. Менделеева. Такое большое число данных позволяет провести их статистическую обработку и обнаружить определенные закономерности. Обобщенные ударные адиабаты веществ предлагались неоднократно, например в [1, 2], но при этом они считались линейными в плоскости массовая скорость — скорость ударной волны. Ниже рассматриваются обобщенные ударные адиабаты элементов, свободные от этого предположения.

Нулевые изотермы веществ можно приближенно получить из ударных адиабат, если известна зависимость коэффициента Грюнайзена от объема. Более точно нулевые изотермы рассчитаны пока только для водорода и дейтерия [3, 4]. Экспериментально получены изотермы этих веществ при температуре, близкой к 4 К [5, 6]. Ниже показано, что достаточно знать ударную адиабату и нулевую изотерму одного вещества, чтобы найти изотермы при 0 К для многих других веществ.

**Две группы ударных адиабат элементов.** В плоскости массовая скорость — скорость ударной волны экспериментальные ударные адиабаты часто приближают отрезками прямых линий

$$D = a + bu. \quad (1)$$

где  $D$  — скорость ударной волны;  $u$  — массовая скорость;  $a$ ,  $b$  — постоянные. Величину  $b$  в (1) можно рассматривать как производную  $b = dD/du$  в некоторой промежуточной точке ударной адиабаты. Значение  $b$  меняется вдоль адиабаты Гюгио с увеличением плотности вещества в ударной волне [7]. В работе [8] на основе анализа экспери-