

ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА НАНОУГЛЕРОДА

В. В. Даниленко

ЗАО «АЛИТ», 03067 Киев, Украина, vvdan@list.ru

На фазовой диаграмме углерода установлены положения линий плавления и термодинамического равновесия детонационных наноалмазов, или ультрадисперсных алмазов, в зависимости от размеров их частиц. Определено положение семейства тройных точек, расположенных в интервалах давления $13.5 \div 16.5$ ГПа и температуры $2\,210 \div 4\,470$ К и определяющих область жидкого состояния наноуглерода. Алмазная область на фазовой диаграмме наноуглерода разделяется на три части по виду наночастиц: наноалмаз, жидкий наноуглерод (наноклапты), аморфный наноуглерод.

Ключевые слова: наноуглерод, фазовая диаграмма, наноалмаз, термодинамические расчеты.

ВВЕДЕНИЕ

Еще в 1963 году при открытии синтеза детонационных наноалмазов (УДА) сопоставлялись фазовая диаграмма углерода и параметры детонации [1, 2]. Оказалось, что даже если взять только знак наклона линии плавления алмаза, это уже качественно влияет на выводы о механизме образования УДА: при отрицательном наклоне условия в плоскости Чепмена — Жуге попадают в область жидкого углерода, а при положительном наклоне — в область алмаза [2].

Однако влияние поверхностной энергии наночастиц изменяет вид фазовых диаграмм дисперсных систем в сравнении с таковыми для массивных монокристаллов [3–5]. Появляется еще одна переменная — размер частиц. Изменяются границы жидкой фазы и равновесные давления полиморфных превращений. Известно, что температура плавления ультрадисперсных частиц заметно снижается с уменьшением их размеров, например, для частиц размером ≈ 4 нм на $\approx 25\%$ [3, 4]. Поэтому использование фазовой диаграммы массивного углерода для анализа условий синтеза наноалмазов некорректно [6] и может приводить к неверным выводам о механизме образования алмазных наночастиц при детонации взрывчатых веществ (ВВ).

Влияние дисперсности углерода в детонационных процессах на равновесные давления графит — алмаз рассматривалось в [7–11]. В работах [7, 8] найдено расчетное увеличение равновесного давления для системы отдельных частиц алмаза и графита, имеющих разное количество атомов и две формы кристаллов: тер-

модинамическую (в форме октаэдра) и компактную (в форме призмы). Согласно [7, 8] в зоне химической реакции детонационной волны в тротиле плотностью более 1.55 г/см³ существуют алмаз и графит в виде частиц алмаза в форме октаэдра размером ≈ 20 нм или в форме призмы размером ≈ 4 нм. При температуре $T = 3\,500$ К (примерная температура детонации в плоскости Чепмена — Жуге) равновесное давление для таких частиц составляет $18 \div 20$ ГПа, что согласуется с экспериментом [12]. Расчетное значение равновесного давления растет с уменьшением размера частиц и с увеличением температуры.

Однако предлагаемая авторами [7, 8] компактная форма алмаза не встречается ни у природных, ни у синтетических алмазов, а расчетный размер октаэдрических частиц примерно на порядок больше получаемых при детонации частиц, причем частиц сферических. Отметим, что общим правилом кристаллизации наночастиц из пара является образование сферических форм без какой-либо огранки (для частиц размером $\lesssim 20$ нм), что справедливо и для наноалмазов.

Кроме того, расчеты проведены для отдельных изолированных друг от друга частиц алмаза и графита, но частицы наноалмазов всегда покрыты слоем неалмазных форм углерода [13–15], что требует учета взаимодействия алмаза и аморфного углерода. Поверхностная энергия межфазовой границы намного меньше, чем на границе кристалл — вакуум.

В работах [10, 11] на основании термодинамических расчетов сообщается о смещении линий фазового равновесия и температуры плав-

ления углерода с ростом его дисперсности, но, к сожалению, не приводятся графические данные для построения фазовой диаграммы наног углерода.

В весьма грубом (полукачественном) приближении в [16] предлагается трехмерный вид фазовой диаграммы ультрадисперсного углерода, который не пригоден для анализа условий синтеза наноалмазов.

В [17, 18] утверждается, что при размерах частиц $2.5 \div 3$ нм алмаз термодинамически стабильнее графита, что противоречит данным [7, 8].

В данной работе приводятся результаты простых термодинамических расчетов положения на фазовой диаграмме углерода линий равновесия и плавления наноалмаза. В расчетах учитывалась только поверхностная энергия межфазных границ. Недостаток данных по теплофизическим свойствам алмаза и наноалмаза при высоких давлениях и температурах вынуждает принять ряд допущений. Поэтому полученные результаты надо рассматривать как оценочные, возможно, требующие в будущем уточнения.

1. ЛИНИИ РАВНОВЕСИЯ НАНОАЛМАЗ — АМОРФНЫЙ УГЛЕРОД

С учетом поверхностной энергии наночастиц равновесное давление увеличивается на величину p_s :

$$p_d = p_\infty + p_s. \quad (1)$$

В линейном приближении с учетом координат тройной точки линия термодинамического равновесия алмаз — графит без влияния поверхности определяется выражением

$$p_\infty = 0.6 + 2.9 \cdot 10^{-3} T \text{ [ГПа]}. \quad (2)$$

Значение p_s рассчитывается следующим образом:

$$p_s = \frac{dp}{d\Delta F} E_s, \quad (3)$$

где $dp/d\Delta F$ — производная, определяемая на линии равновесия (где разность термодинамических потенциалов $\Delta F = 0$) и связывающая энергию (ΔF) и давление. Из термодинамических расчетов значений ΔF [19] найдена следующая зависимость производной $dp/d\Delta F$ от температуры на линии равновесия:

$$\frac{dp}{d\Delta F} = 0.3 - 10^{-5} T \text{ [ГПа/(кДж/моль)]}. \quad (4)$$

Поверхностная энергия межфазных границ E_s для сферических частиц равна

$$E_s = S\sigma_{d-a}, \quad (5)$$

где $S = 6v_d/d$ — удельная площадь поверхности алмазного ядра (диаметром d) частицы наноалмаза; σ_{d-a} — удельная поверхностная энергия межфазной границы алмаз — аморфный углерод (поскольку, согласно [13–15], частицы УДА покрыты слоем аморфного углерода).

Для оценки значения σ_{d-a} используем выражение из [20] для границы кристалл — жидкость (считая превращение алмаз — аморфный углерод псевдоплавлением алмаза):

$$\sigma_{d-a} = 2(v_a - v_d)\sigma_d/3v_a, \quad (6)$$

где v_a, v_d — удельные объемы аморфного углерода и алмаза соответственно; σ_d — удельная поверхностная энергия алмаза на границе с вакуумом. Для октаэдрических поверхностей алмаза $\sigma_d = 5 \cdot 10^{-4}$ Дж/см² при $T = 3000$ К [21]. Тогда выражение (1) для расчетов принимает вид

$$p_d = 0.6 + 2.9 \cdot 10^{-3} T + (0.3 - 10^{-5} T) \times \\ \times 240(v_a - v_d)dv_d/v_a \text{ [ГПа]}. \quad (7)$$

Таблица 1

Удельные объемы аморфного углерода и алмаза

p , ГПа	v , см ³ /г, при T , К				
	2000	2500	3000	3500	4000
10	0.5358	0.5467	0.5587	0.5720	0.5870
	0.2800	0.2887	0.2913	0.2938	0.2964
13.5	0.5098	0.5179	0.5267	0.5364	0.5470
	0.2785	0.3896	0.2896	0.2922	0.2947
15	0.5008	0.5082	0.5161	0.5247	0.5341
	0.2778	0.2864	0.2889	0.2914	0.2940
17	0.4903	0.4968	0.5038	0.5113	0.5195
	0.2769	0.2854	0.2879	0.2905	0.2930
20	0.4770	0.4825	0.4885	0.4948	0.5015
	0.2755	0.2840	0.2865	0.2890	0.2916

Примечание. Верхние значения — удельные объемы для аморфного углерода, нижние — для алмаза.

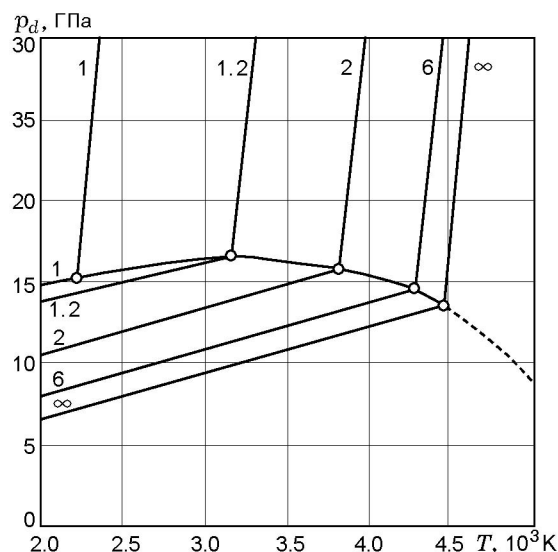


Рис. 1. Линии плавления нанодиамаза и термодинамического равновесия нанодиамаз — аморфный углерод и семейства тройных точек на фазовой диаграмме углерода:

числа у линий — размеры алмазного ядра (нм) в частицах нанодиамаза

Значения удельных объемов v_a и v_d в зависимости от давления и температуры рассчитывались с помощью следующих уравнений состояния.

(а) Поскольку уравнение состояния аморфного углерода, покрывающего частицы УДА, неизвестно, в расчетах использовалось уравнение состояния несовершенного (турбостратного) пирографита [19]:

$$p = 0.0746(\delta^6 - 1) + (-0.2267 + 0.2712\delta)T_e + 0.0358\delta^{0.5}T_e^2, \quad (8)$$

где $\delta = v_0/v$, $v_0 = 0.556 \text{ см}^3/\text{г}$, $T_e = T/11\,600$, p — в Мбар, T — в К.

(б) Уравнение состояния алмаза применялось в предположении, что соответствующие уравнения алмаза и нанодиамаза одинаковы, а объемная сжимаемость алмаза постоянна [19]:

$$v = v_0(1 + \alpha T)(1 - \beta p), \quad (9)$$

где $v_0 = 0.284 \text{ см}^3/\text{г}$, $\alpha = 2.54 \cdot 10^{-6} c_v [\text{К}^{-1}]$, c_v — удельная теплоемкость, $\beta = 0.16 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{Н}$.

Некоторые результаты расчетов по уравнениям (8) и (9) приведены в табл. 1, по (7) — в табл. 2 и на рис. 1.

Полученные расчетные линии $p_d(T)$ практически параллельны равновесной линии $p_\infty(T)$ (так как значения p_s мало изменяются с температурой) и пересекаются в тройных точках с линиями плавления (см. рис. 1). Как видно из табл. 2, влияние поверхностной энергии с уменьшением размера частиц УДА вызывает значительное увеличение давления термодинамического равновесия (примерно в два раза при $d = 1 \text{ нм}$). Заметим, что линии термодинамического равновесия не совпадают с кинетическими линиями превращения.

2. ЛИНИИ ПЛАВЛЕНИЯ НАНОАЛМАЗА

В зависимости от размера частиц d температура их плавления T_d определяется выражением [3]

$$T_d/T_\infty = T' = 1 - 6\sigma_{c-f}v_f/\lambda_d d, \quad (10)$$

где T_∞ — температура плавления массивного монокристалла, $\lambda_d = \Delta S T_d$ — теплота плавления, ΔS — скачок энтропии при плавлении, v_f — удельный объем жидкости, σ_{c-f} — поверхностная энергия границы кристалл — жидкость.

Оценим значения этих величин для массивного алмаза. Параметры тройной точки: $p = 13.5 \text{ ГПа}$, $T = 4470 \text{ К}$, наклон линии плавления 10.2 К/ГПа [22], $v_f = 0.311 \text{ см}^3/\text{г}$ [23]; наш расчет с помощью (9) дает для алмаза значение $v_d = 0.295 \text{ см}^3/\text{г}$ (см. табл. 1). Тогда изменение объема при плавлении составит $\Delta v = v_f - v_d = 0.016 \text{ см}^3/\text{г}$, и из уравнения Клапейрона — Клаузиуса получаем значения скачка энтропии $\Delta S = 1.6 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot\text{К})$ и теплоты плавления алмаза в тройной точке $\lambda_\infty = 7.2 \text{ кДж}/\text{г}$.

Для сравнения приведем некоторые параметры плавления графита ($T = 4800 \text{ К}$, $p = 1 \text{ ГПа}$): $\Delta S = 2.08 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot\text{К})$, $\lambda_\infty = 10 \text{ кДж}/\text{г}$, скачок объема $\Delta v = 0.028 \text{ см}^3/\text{г}$ [24].

Для оценки величины σ_{c-f} (для алмаза — σ_{d-f}) используем выражение (6) из работы [20]:

$$\sigma_{d-f} = 2(v_f - v_d)\sigma_d/3v_f.$$

Считая параметры $\sigma_d = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}/\text{см}^2$, v_f и v_d постоянными (как в тройной точке), получаем для границы алмаз — жидкий углерод $\sigma_{d-f} = 0.172 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}/\text{см}^2$, что значительно меньше, чем σ_d .

Преобразуем выражение (10):

Таблица 2
Равновесное давление для наноалмазов

d , нм	p_d , ГПа, при T , К				
	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000
1.0	14.7 (8.5)	16.0 (8.1)	17.2 (7.9)	18.5 (7.8)	19.8 (7.6)
1.2	13.4 (7.0)	14.5 (6.8)	15.9 (6.6)	17.3 (6.5)	18.8 (6.4)
1.5	12.0 (5.6)	13.2 (5.4)	14.6 (5.3)	16.0 (5.2)	17.3 (5.1)
2	10.7 (4.3)	12.1 (4.2)	13.4 (4.1)	14.8 (4.0)	16.1 (3.9)
3	9.3 (2.9)	10.7 (2.9)	12.1 (2.8)	13.5 (2.7)	14.9 (2.7)
4	8.7 (2.3)	10.1 (2.3)	11.5 (2.2)	12.9 (2.1)	14.2 (2.0)
6	8.0 (1.6)	9.4 (1.6)	10.8 (1.5)	12.2 (1.4)	13.6 (1.4)
∞	6.4	7.85	9.3	10.75	12.2

Примечание. В скобках указаны значения p_s .

$$T' = 1 - 4\sigma_d \Delta v / \Delta S T' T_\infty d, \quad (11)$$

$$T' = 0.5 + (0.25 - 4\sigma_d \Delta v / \Delta S T_\infty d)^{0.5}.$$

Из (11) следует, что существует минимальный размер частиц d_{\min} , для которого $T'_{\min} = 0.5$:

$$d_{\min} = 16\sigma_d \Delta v / \Delta S T_\infty.$$

Для УДА при $T_\infty = 4\,470$ К

$$d_{\min} = 17.9 \Delta v / \Delta S. \quad (12)$$

Экспериментально определенный минимальный размер частиц УДА равен 1.8 нм [25]. Учитывая, что каждая частица УДА покрыта слоем аморфного углерода толщиной δ , получаем: $1.8 = d_{\min} + 2\delta$, где d_{\min} — минимальный диаметр алмазного ядра в частице. Согласно [13] $\delta < 0.5$ нм. Принимая $\delta = 0.4$ нм, получаем $d_{\min} = 1$ нм. Тогда из (12) следует $\Delta v / \Delta S = 0.056$ и для $\Delta v = 0.016$ см³/г находим, что $\Delta S = 0.286$ Дж/(г·К). Значение Δv с давлением уменьшается быстрее, чем ΔS [26], поэтому наклон линии плавления с давлением уменьшается. Мы не можем рассчитать это уменьшение, поэтому принимаем, что $dT/dp = \text{const} = 10.2$ К/ГПа (как в тройной точке для массивного алмаза [22]). Малое значение скачка энтропии при плавлении наноалмазов объясняется большим влиянием дефектных поверхностных слоев наночастиц, которые уже находятся в разупорядоченном предплавленном состоянии.

В рамках принятых допущений выражение (11) принимает вид

$$T' = 0.5 + [0.25(1 - 1/d)]^{0.5}. \quad (13)$$

Таким образом, в наших расчетах в пределах $p = 10 \div 30$ ГПа, $T = 2\,000 \div 4\,500$ К для частиц УДА размером более 1 нм принимаем постоянными следующие величины: $\sigma_d = 5 \cdot 10^{-4}$ Дж/см², $\Delta v / \Delta S = 0.056$, $v_f = 0.311$ см³/г, наклон линии плавления $dT/dp = 10.2$ К/ГПа и $T_\infty = 4\,470 + 10.2(p - 13.5)$.

Результаты расчета зависимости $T_d(d)$ при $p = 20$ ГПа приведены в табл. 3 и на рис. 2. Температура плавления быстро падает у частиц размером менее 2 нм и медленно у частиц размером более 3 нм, а у частиц диаметром бо-

Таблица 3
Температура плавления частиц наноалмазов ($p = 20$ ГПа)

d , нм	T_d , К	T_d/T_∞
1.0	2 270	0.5
1.2	3 190	0.70
1.5	3 580	0.79
2	3 870	0.85
3	4 120	0.91
4	4 230	0.93
6	4 340	0.95
∞	4 536	1.0

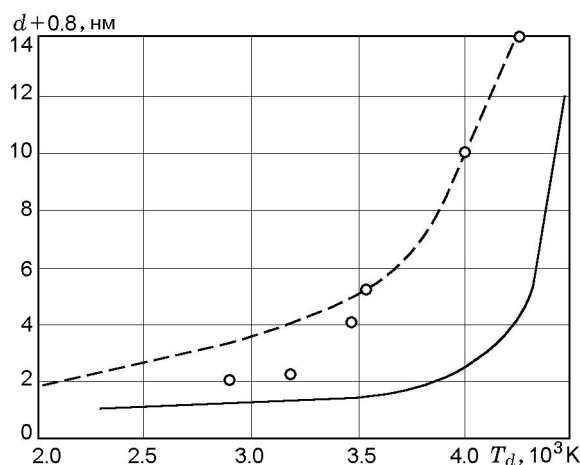


Рис. 2. Зависимость температуры плавления частиц УДА от их размера при $p = 20$ ГПа:

сплошная линия — результаты данной работы, штриховая — расчет [27], точки — эксперимент [27]

лее 10 нм практически такая же, как у массивного монокристалла (см. рис. 1, 2). По сравнению с монокристаллом температура плавления предельно малых частиц наноалмазов снижается вдвое.

В [27] приведена расчетная зависимость температуры плавления частиц наноалмаза от их размера (см. рис. 2). К сожалению, в [27] не объясняется, как были определены необходимые для расчетов величины (например, поверхностное натяжение и плотность жидкого углерода); не указано, как проводились измерения температур плавления частиц наноалмаза в интервале размеров $3 \div 30$ нм.

3. ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА НАНОУГЛЕРОДА

Для любых ультрадисперсных систем фазовая диаграмма, кроме давления и температуры, имеет еще один параметр — размер частиц d , т. е. это трехмерная диаграмма. Но для практики удобнее использовать традиционный вид диаграммы, для которой значение d — параметр. Полученная в результате расчетов фазовая диаграмма наноуглерода в интервале $T = 2000 \div 4500$ К для диаметров алмазного ядра в частицах УДА более 1 нм показана на рис. 1. Пересечение линий плавления наноалмаза и равновесия наноалмаз — аморфный углерод для частиц различных размеров дает семейство тройных точек, которое значительно расширяет область жидкого наноуглерода (нанокапель) в сторону низких температур. Линия

Таблица 4
Координаты тройных точек на фазовой диаграмме для наноалмазов

d , нм	p , ГПа	T , К
1	15.2	2 210
1.2	16.5	3 160
1.5	16.1	3 550
2	15.6	3 820
3	15.2	4 090
4	14.8	4 190
6	14.5	4 300
∞	13.5	4 470

тройных точек для частиц различного размера лежит в диапазонах $p = 13.5 \div 16.5$ ГПа, $T = 2210 \div 4470$ К и, по-видимому, продолжает линию плавления графита в алмазной области. Если с уменьшением размера частиц область жидкого наноуглерода растет, то область термодинамической стабильности наноалмазов со стороны низких давлений уменьшается. Координаты тройных точек для наноалмаза даны в табл. 4.

Вся область алмаза на фазовой диаграмме разделяется на три части: наноалмаз, нанокап-

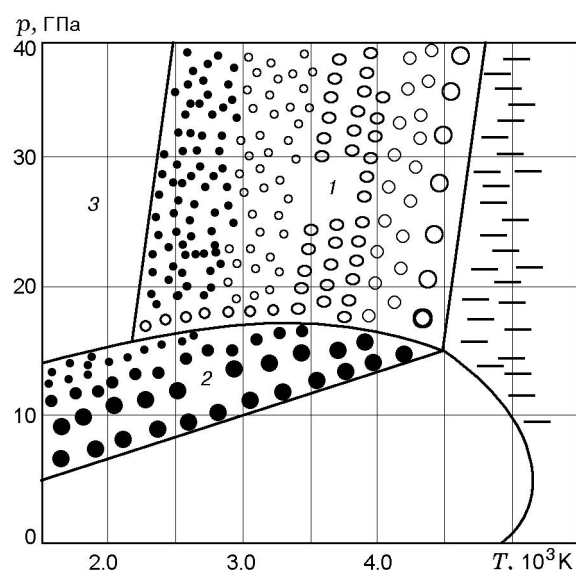


Рис. 3. Области различного состояния наноуглерода на фазовой диаграмме:

1 — жидкий наноуглерод (нанокапли), 2 — наноалмаз, 3 — аморфный наноуглерод; условно показано направление уменьшения размера частиц

ли углерода и аморфные наночастицы (рис. 3). Если принять $d = 1$ нм — наименьший возможный размер наноалмаза, то линию плавления для $d = 1$ нм можно рассматривать как линию перехода «жидкий наноуглерод — аморфный наноуглерод». Реальные размеры частиц УДА с учетом аморфной оболочки толщиной δ определяются как $d_{\text{УДА}} = d + 2\delta$ (в наших расчетах $d_{\text{УДА}} = d + 0.8$ [нм]).

Возникновение и воспроизводство (после химической очистки УДА) аморфной оболочки, по-видимому, связано с невозможностью построить алмазную решетку и свободную алмазную поверхность на сферической поверхности большой кривизны (когда малый радиус наночапель сравним с параметром решетки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью определения вида фазовой диаграммы наноуглерода выполнены расчеты, в результате которых на фазовой диаграмме углерода найдены положения линий плавления наноалмазов и линий термодинамического равновесия наноалмаз — аморфный углерод в зависимости от размеров наноалмазных частиц. В расчетах принято, что наименьший возможный диаметр алмазного ядра равен 1 нм в частице УДА, наименьший измеренный размер которой равен 1.8 нм. Поскольку частицы УДА покрыты слоем аморфного углерода, то в расчетах линий равновесия учитывалась поверхностная энергия межфазовой границы алмаз — аморфный углерод. Определено положение семейства тройных точек, расположенных в интервалах $p = 13.5 \div 16.5$ ГПа, $T = 2210 \div 4470$ К, которое определяет область жидкого состояния наноуглерода (наночапель). Алмазная область фазовой диаграммы наноуглерода делится на три части в соответствии с природой углеродных наночастиц: жидкий наноуглерод, наноалмаз, аморфные наночастицы.

Результаты расчетов показали, что параметры в плоскости Чепмена — Жуге ($p = 20 \div 30$ ГПа, $T = 3000 \div 4000$ К [1, 25]) для ВВ, используемых в синтезе наноалмазов, находятся в области жидкого наноуглерода. Поэтому в результате детонационного разложения молекул ВВ (в зоне химической реакции детонационной волны) образуются наночапли углерода, которые затем кристаллизуются в наноалмазы по схеме пар — жидкость — кристалл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков К. В., Даниленко В. В., Елин В. И. Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 3. С. 123–125.
2. Даниленко В. В. Синтез и спекание алмаза взрывом. М.: Энергоатомиздат, 2003.
3. Морохов И. Д., Трусов Л. И., Чижик С. П. Ультрадисперсные металлические среды. М.: Атомиздат, 1977.
4. Петров Ю. И. Физика малых частиц. М.: Наука, 1982.
5. Морохов И. Д., Трусов Л. И., Лаповок В. Н. Физические явления в ультрадисперсных средах. М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. Chen Quan, Yun Sou Rong, Huang Feng, Lei Ding Jing. Study of formation of condensed carbon in detonation by analyzing graphite and diamond crystallites in soot // 11th Intern. Detonation Symp., Snowmass, Colorado, USA, Aug. 29 — Sept. 4, 1998. P. 214–215.
7. Губин С. А., Одинцов В. В., Пепкин В. И., Сергеев С. С. Влияние формы и размера кристаллов графита и алмаза на фазовое равновесие и параметры детонации ВВ // Хим. физика. 1990. Т. 9, № 3. С. 401–417.
8. Губин С. А., Одинцов В. В., Пепкин В. И., Сергеев С. С. Влияние формы и размера кристаллов графита и алмаза на фазовое равновесие углерода и параметры детонации ВВ // Докл. IV Всесоюз. совещ. по детонации. 1988. Т. 1. С. 13–19.
9. van Thiel M., Ree F. H. Properties of carbon clusters in TNT detonation products. Graphite — diamond transition // J. Appl. Phys. 1987. V. 62, N 5. P. 1761–1767.
10. Викторов С. Б., Губин С. А., Маклашова И. В. Термодинамический расчет диаграммы состояния фаз дисперсного углерода // Физикохимия ультрадисперсных систем: Сб. науч. тр. IV Всерос. конф. М.: МИФИ, 1999. С. 195–196.
11. Викторов С. Б., Губин С. А., Маклашова И. В. Уравнения состояния ультрадисперсных частиц графита и алмаза // Физикохимия ультрадисперсных систем: Материалы V Всерос. конф. М.: МИФИ, 2000. С. 49–50.
12. Разоренов С. В., Канель Г. И., Овчинников А. А. Регистрация ударных волн мандариновыми датчиками и давления перехода графит — алмаз при повышенной температуре // Детонация: Материалы II Всесоюз. совещ. по детонации. Черногловка, 1981. Вып. 2. С. 70–72.
13. Алексенский А. Е., Байдакова М. В., Вуль А. Я., Сиклицкий В. И. Структура алмазного кластера // Физика твердого тела. 1999. Т. 41, вып. 4. С. 740–743.

14. **Алексенский А. Е., Байдакова М. В., Вуль А. Я. и др.** Фазовый переход алмаз — графит в кластерах ультрадисперсного алмаза // Физика твердого тела. 1997. Т. 39, № 6. С. 1125–1134.
15. **Malkov I. Yu., Titov V. M.** Structure and properties of detonation soot particles // Shock Compression of Condensed Matter — 1995: Proc. of the Conf. of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. Seattle, USA, August 13–18, 1995. AIR Press, 1995. Pt 2. P. 783–786.
16. **Верещагин А. Л.** О фазовой диаграмме ультрадисперсного углерода // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38, № 3. С. 119–120.
17. **Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю.** Термодинамическая устойчивость ультрадисперсной алмазной фазы // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 5. С. 135–137.
18. **Badziag P., Verwoerd W. S., Ellis W. P., Greiner N. R.** Nanometre-sized diamonds are more stable than graphite // Nature. 1990. V. 343. P. 244–245.
19. **Даниленко В. В.** Термодинамика превращения графит — алмаз // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 5. С. 137–142.
20. **Задумкин С. Н.** К вопросу о величине межфазной поверхностной энергии металлов на границе кристалл — расплав // Докл. АН СССР. 1960. Т. 130. С. 4.
21. **Алмаз: Справочник** / Под ред. Д. Ф. Федосеева, Н. В. Новикова, А. С. Вишневого и др. Киев: Наук. думка, 1981.
22. **Togaya M.** Thermophysical properties of carbon at high pressure // Advanced Materials'96: Proc. of the 3rd NIRIM Intern. Symp. on Advanced Materials (ISAM'96) Tsukuba, Japan, March 4–8, 1996. P. 251–256.
23. **Молодец А. М.** Изохорно-изотермический потенциал алмаза // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 4. С. 94–101.
24. **Korobenko V. N., Savvatimskiy A. I.** Blackbody design for high temperature (1 800 to 5 500 K) of metals and carbon in liquid states under fast heating // Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry. New York, 2003. V. 7. P. 783–788.
25. **Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю.** Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 3. С. 117–126.
26. **Кормер С. Б., Сеницын М. В., Кириллов Г. А., Урлин В. Д.** Экспериментальное определение температур ударно сжатых NaCl и KCl и их кривых плавления до давлений 700 Кбар // Журн. эксперим. и теор. физики. 1965. Т. 48. С. 1033.
27. **Huang Fenglei, Tong Yi, Yun Shourong.** Synthesis mechanism and technology of ultrafine diamond from detonation // Физика твердого тела. 2004. Т. 46, вып. 4. С. 601–604.

Поступила в редакцию 10/IX 2004 г.