

УДК 534.222.2

О СМЕШЕНИИ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕВЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В ЗОНЕ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

В. В. Митрофанов, В. М. Титов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, titov@hydro.nsc.ru

Вопрос о смешении продуктов детонации смесевых взрывчатых веществ имеет принципиальное значение при рассмотрении синтеза ультрадисперсного алмаза из смесевых составов, а также для химии детонационных процессов в целом. Анализ смешения в зоне химических реакций путем молекулярной диффузии показал, что этот механизм может иметь существенное значение только при размерах зерен компонентов в несколько микрометров, при размерах в десятки-сотни микрометров возможно лишь частичное смешение на границах зерен. Исследование гидродинамического механизма смешения показало, что он может реализоваться вследствие неоднородного поля скоростей за фронтом детонационной волны в смеси, развития турбулентности, кумулятивных процессов при схлопывании пор. При размерах зерен порядка 30 мкм эти процессы могут приводить к заметному смешению за время ≈ 0.5 мкс и более. Полученные оценки сопоставлены с результатами экспериментов, выполненных в ИГиЛ и НПО «Алтай» (г. Бийск) при исследовании синтеза ультрадисперсного алмаза с использованием изотопной методики.

Ключевые слова: ультрадисперсный алмаз (УДА), детонация, смешение, диффузия, изотопный метод.

DOI 10.15372/FGV20160509

ВВЕДЕНИЕ

При синтезе ультрадисперсного алмаза (УДА) обычно используются литые или пресованные заряды взрывчатого вещества (ВВ), состоящие из смесевых составов ТНТ/гексоген или ТНТ/октоген. Поэтому исследование микроструктуры детонационного превращения в таких многокомпонентных смесях имеет принципиальное значение. Возможность прямого наблюдения превращения в микрообъемах ВВ, из которых состоит смесь, крайне ограничена. Таких работ немного (например, [1–3]). Поэтому особенно важен анализ результатов экспериментов, поставленных в различных условиях.

Общая интенсивность обменных процессов между компонентами зависит от размера частиц смеси. В случае литых зарядов это размер нерастворимых в ТНТ зерен гексогена или октогена, который определяет масштаб структуры. В проведенных в Институте гидродинамики экспериментах размер зерна в литых зарядах находился в пределах $50 \div 150$ мкм, хотя в случае октогена иногда использовался порошок со средним размером до 500 мкм. Очевидно, что влияние обменных процессов, в том числе смешения, возрастает с уменьшением разме-

ра зерна.

Смешение продуктов детонации может происходить на основе двух механизмов: диффузионного или гидродинамического. В первом ход процесса определяет диффузия отдельных молекул или их групп (кластеров) из объема одного компонента в соседний. Второй связан с переносом малых, но макроскопических количеств вещества вследствие возникающих течений и их возможных неустойчивостей. В соответствии со сказанным нас интересует возможность смешения за время, характерное для химических реакций во фронте волны в объемах, определяемых начальными размерами зерен.

В отечественной научной литературе вопрос о механизмах смешения за фронтом детонационной волны первым поставил, очевидно, Ю. В. Харитон в связи с изучением природы критического диаметра заряда ВВ [4]. Им, в частности, была показана невозможность объяснения этого явления на молекулярно-диффузионном уровне.

Широкую известность получила работа [5], в которой на примере аматола (смесь ТНТ с нитратом аммония NH_4NO_3) были показаны возможности изотопного метода для исследования процесса смешения при детонации двухкомпонентных ВВ. Авторы [5] получили оценку толщины слоя перемешанного вещества в

0.6 мкм при среднем размере частиц нитрата 8 мкм. В работе исследовалась смесь с 20%-м содержанием ТНТ. На основе результатов авторы предположили диффузионный механизм смешения в данном неидеальном смесевом составе.

Ниже мы рассмотрим более детально возможные механизмы смешения.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ДИФФУЗИЯ

В зоне ударного сжатия, а также на начальной и средней стадиях химической реакции в детонационной волне плотность вещества ρ примерно в 1.5 раза больше начальной плотности ρ_0 . Для малопористых ВВ (прессованных, литых, жидких) молекулы и их фрагменты оказываются при этом ближе друг к другу, чем в обычном конденсированном веществе. Даже при кинетической энергии выше активационных барьеров атомы должны менять направление движения на пути l , равном одному-двум средним расстояниям между ними. Поэтому оценка коэффициента диффузии

$$D \simeq vl/3$$

может рассматриваться в плотной среде как верхняя граница. Принимая для атомов С, О, N скорость равной $v \simeq 10^5$ см/с, а $l \simeq 10^{-7}$ см при $T \simeq 10^3$ К, имеем

$$D \leq 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Поскольку характерное время реакции в детонационной волне $\tau_{cr} < 3 \cdot 10^{-7}$ с, глубина существенного взаимного перемешивания вещества по этому механизму составит

$$\Delta x \simeq 2\sqrt{D\tau_{cr}} < 6 \cdot 10^{-5} \text{ см}. \quad (1)$$

Порядок оценки (1) тот же, что и в [5], где она соответствовала примерно 12%-му перемешиванию по массе.

Оценка величины Δx сохранится, если рассматривать и диффузионное движение фрагментов из молекул (кластеры). Связь коэффициента диффузии D с вязкостью среды η можно приближенно принять в виде $D \simeq kT/3\pi\eta\alpha$, где α — размер кластера. Оценить η можно из соотношений механики необратимых процессов, как это сделано в [6] и независимо в [7]. Тогда, следуя (1), при $\alpha \simeq 1$ нм получаем $\Delta x \leq 0.5$ мкм.

Таким образом, диффузионный механизм может играть заметную роль только при малых размерах зерен ВВ, порядка единиц микрометров.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ

Рассмотрим типичную ситуацию детонации заряда ТНТ/гексоген, используемого для получения УДА. Литой заряд состоит из неплотно упакованных зерен гексогена с ТНТ, заполняющим промежутки между ними. В прессованном заряде зёрна могут быть раздроблены при пластической деформации, но определяют характерный размер δ компонентов. Их объемные и массовые концентрации близки и находятся в интервале $0.2 \div 0.8$. Собственная кристаллическая плотность гексогена составляет $\rho_0 = 1.84$ г/см³, ТНТ — $\rho_0 = 1.66$ г/см³. Для смеси ТНТ/гексоген 50/50 $\rho_0 = 1.65 \div 1.68$ г/см³. Дефицит плотности объясняется дефектностью структуры и наличием микропор.

Ширина ударного скачка при детонации такой смеси заведомо много меньше размера δ , поэтому имеет смысл определить параметры за ударной волной отдельно во фрагментах каждого вещества по данным их индивидуальных ударных адиабат (поры пока не рассматриваем). Фрагменты разных веществ приобретают в ударной волне разные скорости из-за различия плотностей и ударных сжимаемостей. Это может вызвать деформацию границ, развитие на них гидродинамических неустойчивостей, вихреобразование и генерацию турбулентности. Данные явления могут интенсифицировать перемешивание.

Разность скоростей фрагментов Δu_p проще всего оценить, полагая, что они ускоряются во фронте одинаковым давлением за одно и то же время. Тогда

$$\Delta u_p = u_p(\Delta\rho_i/\rho_0),$$

где u_p — средняя массовая скорость, $\Delta\rho_i$ — разница начальных плотностей компонентов. Для смеси ТНТ/гексоген 50/50 имеем $u_s = 7.6 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_0 = 1.66$ г/см³, $\Delta\rho_i = 0.18$ г/см³, $u_p \simeq 2.8 \cdot 10^3$ м/с. Тогда

$$\Delta u_p \simeq 300 \text{ м/с}. \quad (2)$$

Такой же результат получим, если для расчета ударной волны будем использовать обобщенную ударную адиабату, предложенную в [8]:

$$u_s = c_0 + 2u_p - 0.1u_p^2/c_0,$$

где $c_0 = 2.64$ и 2.2 км/с, $\rho_0 = 1.8$ и 1.6 г/см³ для гексогена и ТНТ соответственно. При $p_s = 36.5$ ГПа это дает $u_p = 2.65$ и 2.96 м/с, $u_s = 7.67$ и 7.72 м/с, $\rho_s/\rho_0 = 1.53$ и 1.62 для гексогена и ТНТ соответственно.

Однако, к сожалению, достоверных адиабат для детонационных волновых скоростей мы не знаем, и данные разных авторов, экстраполированные в эту область, существенно расходятся. В частности, адиабаты вида $u_s = a + bu_p$ [9] при одинаковых p_s дают очень близкие значения u_p для обоих веществ, т. е. практически совпадают. Заметим, что в [9] параметры адиабаты для гексогена определялись в области более низких скоростей $u_s = 4.2 \div 5.45$ км/с.

Конечно, поле скоростей в гетерогенной среде не будет однородным вдоль фронта даже в случае полного совпадения адиабат в координатах (p, u_p) , так как из-за различия волновых скоростей в разных частицах фронт не может оставаться плоским. Возникнут хаотические колебания его поверхности с основной частотой u_s/δ . Оценить возможность раскачки таких колебаний и степень неоднородности возникающего поля скоростей без специального анализа трудно.

Не являются также достаточными оценки Δu_p при одинаковых значениях p_s на ударных адиабатах, даже если они точны. Давление фронта обязательно будет пульсировать при несовпадающих адиабатах вследствие перехода ударного фронта через границу между зернами. Расчеты по [8] дают пульсации давления $\Delta p \approx 3$ ГПа и соответствующие пульсации массовой скорости $\Delta u_p \approx 150$ м/с.

Приведенные данные показывают, что можно ожидать пульсаций скорости до сотен метров в секунду. Поэтому в дальнейшем будем считать значение скорости (2) максимальным. Из нее сразу вытекает ограничение снизу на время перемешивания

$$\tau_{mix} > \delta/\Delta u_p,$$

так как центры масс соседних зерен не могут сближаться (что необходимо для смешения) со скоростью, большей Δu_p . Исходя из условия $\Delta x_{ch}/\delta \gtrsim 10$ (Δx_{ch} — ширина зоны химической реакции), выберем размер частиц $\delta \approx 30$ мкм. Тогда

$$\tau_{mix} > 10^{-7} \text{ с.} \quad (3)$$

Фактическое время гидродинамического перемешивания, если оно произойдет, должно быть минимум в 2–3 раза больше. Этот вывод основывается на экспериментальных данных по разрушению жидких капель и струй в воздухе за ударной волной [10–12].

Относительно общего центра масс частицы движутся со скоростью $\approx \Delta u_p/2$. Начальная кинетическая энергия их пульсационного движения в единице массы $K_0 = (\Delta u_p)^2/8 \leq 10^4$ Дж/кг. Эта энергия будет диссипировать. Число Рейнольдса относительного движения основного масштаба

$$\text{Re} = \Delta u_p \delta \rho_s / \eta.$$

В дальнейших оценках мы принимаем $\eta \simeq 10^{-3}$ Па·с, полагая, что состояние среды в процессе ударного сжатия пересекает кривую плавления. По давлению это состояние выше критической точки фазового равновесия жидкость — газ. Выбранное значение η на 1–2 порядка больше вязкости большинства сжиженных газов, экстраполированной к температуре $T \simeq 10^3$ К при обычном давлении. Это увеличение предполагает учет влияния высокого давления, хотя достоверных оценок такого влияния мы не нашли. Данная величина соответствует также максимальным оценкам с позиций газокинетического подхода. Заметим, что она соответствует и оценке, принятой в [4], но меньше оценки, данной в [6]. При выбранном значении η

$$\text{Re} \simeq 10^4 \div 10^5,$$

т. е. возможно развитие турбулентности.

Пока мы учли не всю пульсационную кинетическую энергию. Существенная ее часть может генерироваться фронтом ударной волны вблизи пор в виде значительно больших пульсаций скорости, но в меньшем масштабе. В единице массы вещества при сжатии пор давлением совершается работа $\psi(p_s/\rho_0)$, где ψ — объемная доля пор. Большая часть ее превращается в тепло при торможении, но некоторая доля ζ , зависящая от формы поры, идет в кинетическую энергию кумулятивной струи K' . Полагая $\zeta = 0.2$ (это оценка по порядку величины) при $\psi = 0.02$, получаем

$$K' \simeq \zeta \psi (p_s/\rho_0) \simeq 4 \cdot 10^4 \text{ Дж/кг,}$$

т. е. наличие пор увеличивает пульсационную энергию в несколько раз. Непрерывное распре-

деление пор по размерам приводит к появлению за фронтом ударной волны поля скоростей с пульсациями разных масштабов и интенсивной начальной диссипацией, которое за время порядка $t_1 \simeq \delta/\Delta u_p$ должно породить турбулентность, близкую к изотропной. Поэтому скорость диссипации энергии оценим по законам изотропной турбулентности [13]:

$$\varepsilon \simeq (\Delta u_i)^3/\delta,$$

где $\Delta u_1 = \sqrt{K_1}$ — пульсационная скорость основного масштаба δ к моменту t_1 . Тогда характерное время рассеяния турбулентной энергии

$$\tau_{turb} = K_1/\varepsilon \simeq \delta/\Delta u_1.$$

Мы приняли здесь $K_1 \simeq K_0 + 0.5K'$, полагая, что половина энергии K' диссипирует за время развития турбулентности t_1 . Очевидно, что ввиду наличия начальных пульсаций, генерирующих турбулентность за счет струеобразования, оценка $\Delta u_p \simeq 200$ м/с сохранится, даже если полученная ранее величина Δu_p завышена.

Заметим, что в литых зарядах преобладающий размер крупных пор можно оценить как $\psi^{0.33}\delta \simeq 0.3\delta$ при $\psi = 0.02$, т. е. масштаб струйного движения сравним с размером частиц. Время $t_1 + \tau_{turb}$ можно считать временем гидродинамического перемешивания в рассматриваемой малопористой среде. Тогда

$$\tau_{mix} \simeq t_1 + \tau_{turb} \simeq 3\delta/\Delta u_1. \quad (4)$$

Для частиц размером $\delta = 30$ мкм получаем $\tau_{mix} \simeq 0.5$ мкс. При этом на начальном этапе за время t_1 перемешивание осуществляется в основном струями, возникшими при обжатию пор, и вызванным ими инерционным течением с образованием вихрей. Поэтому грубо можно считать, что перемешивание компонентов смеси происходит равномерно по времени в течение промежутка τ_{mix} . Отметим, что если реальный коэффициент вязкости за ударным фронтом окажется больше принятого выше хотя бы на два порядка, развитие турбулентности будет заведомо исключено [14].

Косвенную информацию о влиянии пористости и размеров частиц на перемешивание компонентов гетерогенных ВВ за ударной волной дают исследования их детонационных свойств. Систематическое исследование критических параметров детонации — критического

диаметра и соответствующей критической скорости — проведено в [15–17] для смесей перхлората аммония (ПХА) с невзрывчатыми горючими веществами, а также с ВВ, имеющими отрицательный кислородный баланс.

Смесь ТНТ/ПХА 32/68 из частиц размером $\delta = 57$ мкм при $\rho_0 = 1.81$ г/см³ имеет критический диаметр детонации $d_{cr} = 8.5 \pm 0.5$ мм и критическую скорость $D_{cr} = 5370$ м/с. Пористость при этом не более 2 %, так как кристаллическая плотность ПХА равна 1.95 г/см³. Замена ПХА на КСI дает $d_{cr} = 25$ мм. Для чистого ПХА $d_{cr} > 70$ мм при $\rho_0 = 1.6$ г/см³. Здесь несомненно происходит частичное перемешивание в зоне реакции, очевидно, по турбулентному механизму. С увеличением пористости перемешивание проявляется сильнее, например, значение d_{cr} для этой смеси при $\rho_0 = 1.1$ г/см³ имеет четкий минимум при содержании ПХА около 60 %. В то же время хорошо известное понижение детонационной способности смесевых ВВ на основе NH₄NO₃ при увеличении плотности выше 1.3 г/см³ свидетельствует об уменьшении степени перемешивания при уменьшении пористости (наряду с уменьшением числа горячих точек).

Таким образом, роль гидродинамических механизмов перемешивания представляется весьма существенной в процессе детонации гетерогенных ВВ. Однако характерные времена такого перемешивания не могут быть меньше приведенных выше оценок. Отметим также, что, в отличие от приведенных экспериментальных данных, при синтезе УДА оба компонента — мощные взрывчатые вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сотрудниками Института гидродинамики были поставлены два эксперимента с целью исследования смешения компонентов при синтезе УДА из смесей ТНТ/гексоген и ТНТ/октоген. Эксперименты базировались на использовании ТНТ, в 58 % молекул которого атом ¹²C в метильной группе был замещен атомом ¹³C. Синтез такого ВВ был осуществлен в лаборатории акад. В. А. Коптюга в Институте органической химии Сибирского отделения АН.

При анализе результатов предполагается, что изменение массы атома не влияет на его реакционную способность. Заряды изготавливались заливкой. Содержание изотопной метки определялось масс-спектрометрией.

Эксперимент № 1

Общие данные

Состав: ТНТ/гексоген 40/60.

Размер зерен гексогена: 50 мкм.

Масса заряда: 35 г.

Содержание изотопной метки (отношение $^{13}\text{C}/\text{C}$) во всем заряде, включая бустерный заряд: 5.4 %.

Отношение $^{13}\text{C}/\text{C}$ в исходных веществах:

ТНТ: 9.3 %,

гексоген: 1.1 % (природное содержание),

ТНТ/гексоген 40/60: 6.0 %.

Отношение $^{13}\text{C}/\text{C}$ в продуктах детонации:

весь конденсированный углерод: 5.9 %,

УДА: 6.8 %,

неалмазные формы углерода: 4.1 %.

Газы:

CO: 4.2 %,

CO₂: 4.6 %,

CH₄: 3.9 %,

C₂H₄: 6.8 %.

Как видно из представленных данных, частицы УДА содержат в 1.66 раза больше изотопной метки, чем неалмазные формы углерода.

Приведенные результаты хорошо укладываются в следующую схему. При размере частиц $\delta = 50$ мкм происходит частичное перемешивание продуктов детонации на границах зерен (как и в проанализированном выше случае с $\delta = 30$ мкм). Вместе с тем полученные результаты можно объяснить только при условии преимущественного образования УДА из углерода, входящего в состав ТНТ. Это и естественно, так как ТНТ имеет отрицательный кислородный баланс, а у гексогена он близок к нулевому.

Результаты эксперимента опубликованы в [18]. Привести достоверный массовый анализ (аналогично [3]) при такой малой массе заряда не имелось возможности. Тем более — сделать это с полным балансом метки.

Эксперимент № 2

Общие данные

Состав: ТНТ/октоген 40/60.

Размер зерен октогена: 100 ÷ 140 мкм.

Масса заряда: 31.14 г.

Содержание изотопной метки во всем заряде 5.03 %.

Отношение $^{13}\text{C}/\text{C}$ в исходных веществах:

ТНТ: 9.23 %,

октоген: 1.1 %.

Отношение $^{13}\text{C}/\text{C}$ в продуктах детонации:

весь конденсированный углерод: 5.94 ±

0.17 %,

УДА: 8.05 ± 0.13 %,

неалмазные формы углерода: 4.2 ± 0.3 %.

Газы:

CO: 4.94 ± 0.55 %,

CO₂: 3.78 ± 0.43 %.

Отношение содержания изотопной метки в алмазной и неалмазной формах углерода в данном опыте равно 1.91. Такой рост по сравнению с предыдущим опытом естественен, так как в соответствии со сказанным выше увеличение размера частиц будет уменьшать долю продуктов, подвергшихся перемешиванию.

Принимая во внимание, что ТНТ в смеси с октогеном в ходе детонации дает в виде конденсированного углерода около 18 % своей массы, как и заряд чистого ТНТ [7], легко получить, что октоген должен давать около 4 % в форме конденсированного углерода. Доля УДА тогда составит 10 ÷ 15 % от этого количества. Содержание алмазной фазы в углероде, возникшем из ТНТ, составляет около 65 %.

Данные по отношению $^{13}\text{C}/\text{C}$ в продуктах детонации позволяют предположить равноправие всех атомов углерода в образовании алмазной фазы. Если хотя бы 20 % атомов углерода метильной группы не участвуют в образовании УДА, отношение $^{13}\text{C}/\text{C}$ в УДА составило бы 6.6 %, что меньше наблюдаемой величины.

Изложенные результаты показывают, что при детонации мощных смесевых ВВ имеет место иерархия уровней (при достаточно крупном размере частиц): в микромасштабе частицы отдельного компонента — гомогенный стохастический процесс при разрушении молекул и начале образования продуктов, а в макромасштабе — существенная гетерогенность и слабое смешение продуктов за время реакции.

Эти результаты опубликованы в «Докладах АН СССР» [19]. В том же номере журнала опубликована работа исследователей из Бийска, решавших аналогичную задачу на смеси ТНТ/гексоген с концентрацией ТНТ от 40 до 80 % [20]. В заряд был введен гексоген, содержащий радиоактивный углерод ^{14}C . Выводы обеих работ аналогичны.

Одновременно в совместной работе исследователей из Новосибирска и Бийска было показано, что уменьшение размера зерна октогена в смеси его с ТНТ увеличивает выход УДА [21]. Этот факт проанализирован в работе [22] с использованием изотопа ^{14}C по атому углерода бензольного кольца, связанному с метиль-

ной группой. Исследования выполнялись на литых зарядах ТНТ/октоген 50/50 при размерах частиц 175 и 6.9 мкм. Выводы бийских исследователей подтвердили все ранее полученные результаты и показали, что увеличение выхода УДА происходит за счет более интенсивного перемешивания продуктов на границах зерен при уменьшении их размера и за счет увеличения количества УДА, образующегося из октогена. Выход УДА из ТНТ при указанных размерах зерен оставался практически неизменным.

Изложенные результаты отражают состояние отечественных исследований по проблеме смешения продуктов детонации мощных смесевых составов за время химической реакции. Факт образования УДА и использование изотопной методики способствовали конструктивному рассмотрению задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. **The Micro-Detonics Facility** // *Energy & Technol. Rev.* / Lawrence Livermore National Laboratory. — 1993, Jan.–Febr. — P. 9.
2. **Blais N. C., Valentini J. J.** Real time analysis of PETN detonation products // *The 8th Symp. (Intern.) on Detonation, Albuquerque, 1985: Proc.* — P. 425.
3. **Greiner N. R., Blais N. C.** Free-expansion experiments and modeling in detonation: chemistry and hydrodynamics on a laboratory scale // *The 9th Symp. (Intern.) on Detonation, Portland, 1989: Prepr. of Papers.* — P. 377.
4. **Харитон Ю. Б.** О детонационной способности взрывчатых веществ // *Вопросы теории взрывчатых веществ.* — М.: Изд-во АН СССР, 1947. — Кн. 1. — С. 51.
5. **Макгайр Р., Орнеллас Д., Акст И.** Химия детонационных процессов: диффузионные явления в неидеальных взрывчатых веществах // *Детонация и взрывчатые вещества.* — М.: Мир, 1981. — С. 160.
6. **Shaw M. S., Johnson J. D.** A slow reaction rate in detonations due to carbon clustering // *Shock Waves in Condensed Matter* — 1987. — Amsterdam a. o.: Elsevier, 1988. — P. 503.
7. **Titov V. M., Anisichkin V. F., Mal'kov I. Yu.** Synthesis of ultrafine diamonds in detonation waves // *9th Symp. (Intern.) on Detonation, Portland, 1989: Prepr. of Papers.* — P. 175.
8. **Афанасенков А. И., Богомоллов В. М., Воскобойников И. М.** Обобщенные ударные адиабаты конденсированных взрывчатых веществ // *ПМТФ.* — 1969. — № 4. — С. 137.
9. **LLNL Explosive Handbook.** Properties of chemical Explosives and Explosive Simulants / V. M. Dobratz (Ed.). — March 1981.
10. **Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Комар С. П.** Особенности разрушения капли вязкой жидкости в ударных волнах // *Инж.-физ. журн.* — 1973. — Т. 25, № 3. — С. 467.
11. **Борисов А. А., Гельфанд Б. Е. и др.** О режимах дробления капель и критериях их существования // *Инж.-физ. журн.* — 1981. — Т. 30, № 1. — С. 64.
12. **Jacobs J. W.** The dynamics of shock accelerated light and heavy gas cylinders // *Phys. Fluids. A.* — 1993. — V. 5, N 9. — P. 2239.
13. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Гидродинамика. — М.: Наука, 1999.
14. **Fray R. B.** Cavity collapse in energetic materials // *8th Symp. (Intern.) on Detonation, Albuquerque, 1985: Proc.* — P. 385.
15. **Акимова Л. Н., Стесик Л. Н., Апин А. Я.** К вопросу о детонационной способности перхлоратных взрывчатых веществ // *Физика горения и взрыва.* — 1967. — Т. 4, № 3. — С. 386–392.
16. **Акимова Л. Н., Стесик Л. Н.** Детонационная способность перхлоратных ВВ // *Физика горения и взрыва.* — 1976. — Т. 12, № 2. — С. 247–251.
17. **Акимова Л. Н.** Детонационная способность смесевых ВВ // *Физика горения и взрыва.* — 1980. — Т. 16, № 2. — С. 143–145.
18. **Анисичкин В. Ф., Дерендяев Б. Г., Коптюг В. А., Мальков И. Ю., Салахутдинов Н. Ф., Титов В. М.** Исследование процесса разложения в детонационной волне изотопным методом // *Физика горения и взрыва.* — 1988. — Т. 24, № 3. — С. 121–122.
19. **Анисичкин В. Ф., Дерендяев Б. Г., Мальков И. Ю., Салахутдинов Н. Ф., Титов В. М.** Исследование процесса детонации конденсированных ВВ изотопным методом // *Докл. АН СССР.* — 1990. — Т. 314, № 4. — С. 879.
20. **Козырев Н. В., Брыляков П. М., Сен Чен Су, Штейн М. А.** Исследование процесса синтеза ультрадисперсных алмазов методом меченых атомов // Там же. — С. 889.
21. **Sakovich G. V., Titov V. M., Brylyakov P. M., et al.** Synthesis of diamond clusters by explosion // *X Intern. Conf. «High Energy Rate Fabrication», Ljubljana, 1989: Proc.* — P. 179.
22. **Козырев Н. В., Калашникова Г. С., Голубева Е. С., Сен Чен Су, Штейн М. С.** Исследование механизма влияния дисперсности октогена на синтез ультрадисперсных алмазов // *Детонация: X Симпоз. по горению и взрыву: тез. докл.* — Черногловка, 1992. — С. 120.