

Отрицательные давления и откол в мишенях из графита при нано- и пикосекундном лазерном воздействии

Р.С.Беликов, И.К.Красюк, Т.Ринеккер, А.Ю.Семенов, О.Н.Розмей,
И.А.Стучебрюхов, М.Томут, К.В.Хищенко, А.Шёнляйн

Приведены результаты экспериментов по изучению явления откола в мишенях из графита при ударно-волновом воздействии нано- и пикосекундной длительности, выполненных на лазерных установках «Камертон-Т» (ИОФ РАН, Москва, Россия) и PHELIX (GSI, Дармштадт, Германия). В диапазоне скоростей деформирования $10^6 - 10^7 \text{ с}^{-1}$ впервые получены данные по динамической механической прочности этого материала на разрыв (откол). При максимальной реализованной скорости деформирования $1.4 \times 10^7 \text{ с}^{-1}$ достигнута откольная прочность 2.1 ГПа, что составляет 64% от теоретического предела прочности графита. Откол наблюдался не только на тыльной стороне мишени, но и на ее облучаемой (лицевой) поверхности. С помощью оптического и сканирующего электронного микроскопов изучена морфология лицевых и тыльных поверхностей исследованных мишеней. Методом комбинационного рассеяния света исследована структура графита как в области лазерного воздействия на лицевой поверхности мишени, так и на ее тыльной стороне в зоне откола. Проведено сравнение динамических прочностей графита и синтетического алмаза.

Ключевые слова: лазерное излучение пикосекундной и наносекундной длительности, абляционное давление, ударная волна, отрицательное давление, откольное явление, скорость деформирования, предельная прочность, численное моделирование, графит.

1. Введение

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по изучению откольного явления в мишенях из графита. Для создания растягивающего напряжения (отрицательного давления) образцы подвергались ударно-волновому воздействию лазерного импульса длительностью 1.4 нс на лазерной установке PHELIX (GSI, Дармштадт, Германия) и 70 пс на лазерной установке «Камертон-Т» (ИОФ РАН, Москва, Россия). В обоих случаях длина волны лазерного излучения составляла 0.53 мкм.

Явление откола использовано для получения сведений о динамической механической прочности исследуемого материала на разрыв [1]. Откол возникает вблизи тыльной (свободной) поверхности мишени в результате отражения волны сжатия, генерируемой под действием импульса лазерного излучения на лицевую сторону мишени. В результате отражения свободная поверхность мишени приходит в движение, что вызывает распространение волны разгрузки навстречу импульсу сжатия (за которым также следует волна разгрузки). На некотором расстоянии от тыльной поверхности давление в мишени становится отрицательным (причем растягивающее на-

пряжение может превысить предел прочности материала на разрыв) и образуется откольный слой, который отлетает от исходной мишени.

В экспериментах были исследованы образцы из поликристаллических графитов MF-307 (плотность 2 г/см^3) и PG (плотность 1.84 г/см^3).

Теоретический предел прочности вещества σ_t может быть оценен сверху, исходя из параметров его ударной адиабаты, по формуле $\sigma_t = \rho c_0^2 / (4b)$, где ρ – плотность вещества; c_0 и b – коэффициенты ударной адиабаты $D = c_0 + bU$ [2]; D – скорость фронта ударной волны; U – массовая скорость. Из базы данных ударно-волновых экспериментов [3] для графита MF-307 имеем $c_0 = 3 \text{ км/с}$, $b = 1.35$. В результате получаем для предельной прочности графита MF-307 оценку сверху 3.3 ГПа. Аналогичная величина в случае графита PG оказывается равной 2.7 ГПа.

Интерес к исследованию динамической механической прочности графита связан с тем, что к настоящему времени в литературе нет данных о физических свойствах графита при отрицательных давлениях. Представляет также интерес сравнить данные по динамической прочности графита с аналогичными данными для другой аллотропной формы углерода – алмаза.

2. Условия экспериментов

Эксперименты выполнены на лазерных установках «Камертон-Т» и PHELIX, работающих на неодимовом стекле. Лазерное излучение этих установок преобразовано во вторую гармонику с длиной волны 0.53 мкм. Энергия импульса лазерного излучения в первом случае составляла 1 Дж, а во втором – 120 Дж. Лазерное излучение фокусировалось на мишени в пятна диаметром от 0.4 до 3.7 мм. Максимальная плотность потока лазерного излучения в области фокусировки достигала $1.6 \times 10^{13} \text{ Вт/см}^2$, а абляционное давление было равно 0.6 ТПа. Данные экс-

И.К.Красюк, А.Ю.Семенов, И.А.Стучебрюхов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: krasuyuk@kapella.gpi.ru

Р.С.Беликов, К.В.Хищенко. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2

О.Н.Розмей. GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Germany, 64291 Darmstadt, Planckstraße, 1

Т.Ринеккер, А.Шёнляйн. Goethe University Frankfurt am Main, Germany, 60323 Grüneburgplatz, 1

М.Томут. Technische Universität Darmstadt, Germany, 64289 Darmstadt, Karolinenplatz, 5

Поступила в редакцию 29 января 2015 г., после доработки – 10 апреля 2015 г.

Табл.1. Экспериментальные данные.

Номер образца	Образец	$D_{\text{инп}}$ (мм)	$E_{\text{лас}}$ (Дж)	$I_{\text{лас}}$ (ТВт/см ²)	p_a (Мбар)	$D_{\text{сп}}$ (мм)	H_0 (мкм)	$h_{\text{сп}}$ (мкм)
1	Графит MF-307	0.343	0.748	11.0	4.1	0.343	220	65
2	«Камертон-Т», $\tau = 70$ пс,	0.370	0.941	11.5	4.3	0.411	220	70
3	$\lambda = 0.53$ мкм)	0.288	0.826	16.0	5.5	0.320	410	175
4	Графит PG-5	3.70	122	2.1	1.3	3.1	2100	400
5	(PHELIX, $\tau = 1.4$ нс,	1.35	120	6.0	2.8	3.5	2000	200
6	$\lambda = 0.53$ мкм)	1.35	107	5.4	2.6	2.87	1100	80

Примечания: $D_{\text{инп}}$ – диаметр пятна фокусировки; $E_{\text{лас}}$ – энергия лазерного импульса; $I_{\text{лас}}$ – интенсивность лазерного излучения в пятне фокусировки на мишени; p_a – абляционное давление; $D_{\text{сп}}$ – диаметр зоны откола; H_0 – толщина мишени; $h_{\text{сп}}$ – толщина откольной пластины; τ и λ – длительность и длина волны лазерного излучения соответственно.

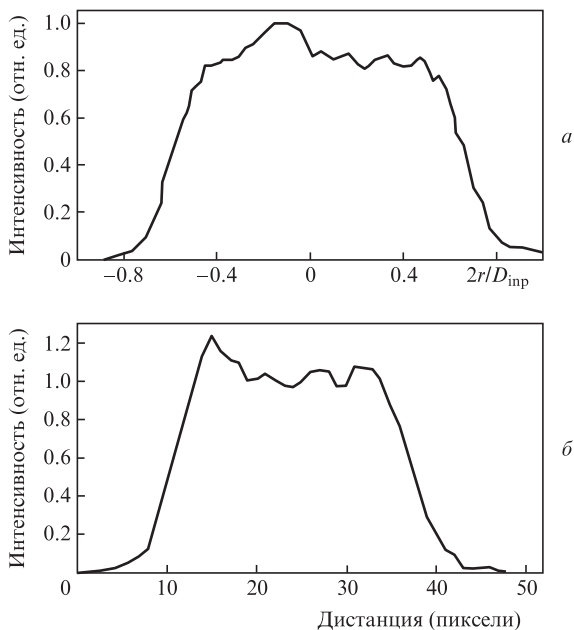


Рис.1. Поперечное распределение лазерного излучения установки «Камертон-Т» в ближней зоне (а) и рентгеновская обскурограмма горячей зоны в области фокуса на мишени для установки PHELIX (б); 1 пиксель равен 50 мкм, размер горячей области – 1.35 мкм.

периментов приведены в табл.1. На рис.1 показаны поперечное распределение лазерного излучения в ближней зоне («Камертон-Т») и рентгеновская обскурограмма горячей зоны в области фокуса (PHELIX). Схема опытов приведена на рис.2.

Морфология лицевой и тыльной поверхностей образцов после лазерного воздействия исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Рельеф зоны разрушения и глубина возникшего кратера на обеих сторонах образцов измерялись с использованием оптическо-

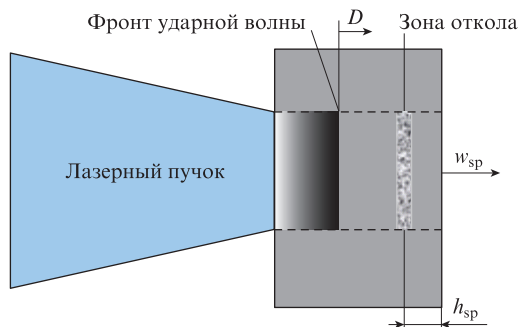


Рис.2. Схема опытов (D – скорость фронта ударной волны; $h_{\text{сп}}$ и $w_{\text{сп}}$ – толщина и скорость откольной пластинки соответственно).

го металлографического микроскопа МФ-8 с точностью 1 мкм.

Структура вещества на облученных и откольных поверхностях мишеней анализировалась методом комбинационного рассеяния (КР) света на конфокальном спектрометре HR800-180 (Horiba Jobin Yvon) со спектральным разрешением 0.5 см⁻¹. Для возбуждения КР использовались два типа лазеров: He-Ne-лазер с длиной волны излучения $\lambda = 632.8$ нм (мощность 20 мВт) и Nd:YAG-лазер с $\lambda = 532$ нм (мощность 40 мВт). В обоих случаях пространственное разрешение составляло 2 мкм.

3. Метод определения откольной прочности и скорости деформирования

Для определения откольной прочности σ^* и скорости деформирования \dot{V}/V_0 среды (V_0 – начальный удельный объем, а \dot{V} – скорость его изменения) использовался подход, основанный на измерении глубины откольной выемки h после импульсного лазерного воздействия на мишень с последующим математическим моделированием ударно-волнового процесса в исследуемом образце [4, 5]. Для расчета величин σ^* и \dot{V}/V_0 применялся численный код, реализующий алгоритм Куранта–Изаксона–Риса на основе уравнений гидродинамики [6]. В коде было использовано уравнение состояния графита, полученное на основе полуэмпирической модели [7]. Предполагалось, что форма импульса абляционного давления на лицевой поверхности мишени повторяет форму импульса лазерного излучения.

Связь между амплитудой импульса абляционного давления p_a (в ТПа) и интенсивностью лазерного излучения $I_{\text{лас}}$ (в ТВт/см²) задавалась полуэмпирическими формулами [8]

$$p_a = \begin{cases} 1.2(10^{-2}I_{\text{лас}})^{2/3}\lambda^{-2/3}[A/(2Z)]^{3/16} & \text{при } I_{\text{лас}} \geq 4.3 \text{ ТВт/см}^2, \\ 1.4(10^{-2}I_{\text{лас}})^{7/9}\lambda^{-3/4} & \text{при } I_{\text{лас}} < 4.3 \text{ ТВт/см}^2, \end{cases}$$

где λ – длина волны лазерного излучения в мкм; A – атомный вес; Z – атомный номер вещества мишени.

В экспериментах фиксировалась интенсивность лазерного импульса, при которой происходил откол. Затем проводилось численное моделирование распространения ударной волны по мишени. Результаты одного из вариантов расчетов приведены на рис.3. В этом случае за откольную прочность (прочность на растяжение) при пороговых амплитудах ударного воздействия принимался модуль минимального расчетного давления (отрицательного по величине) в плоскости откола: $\sigma^* = |p_{\text{min}}|$ (рис.3,в). Скорость деформирования определялась по расчетной

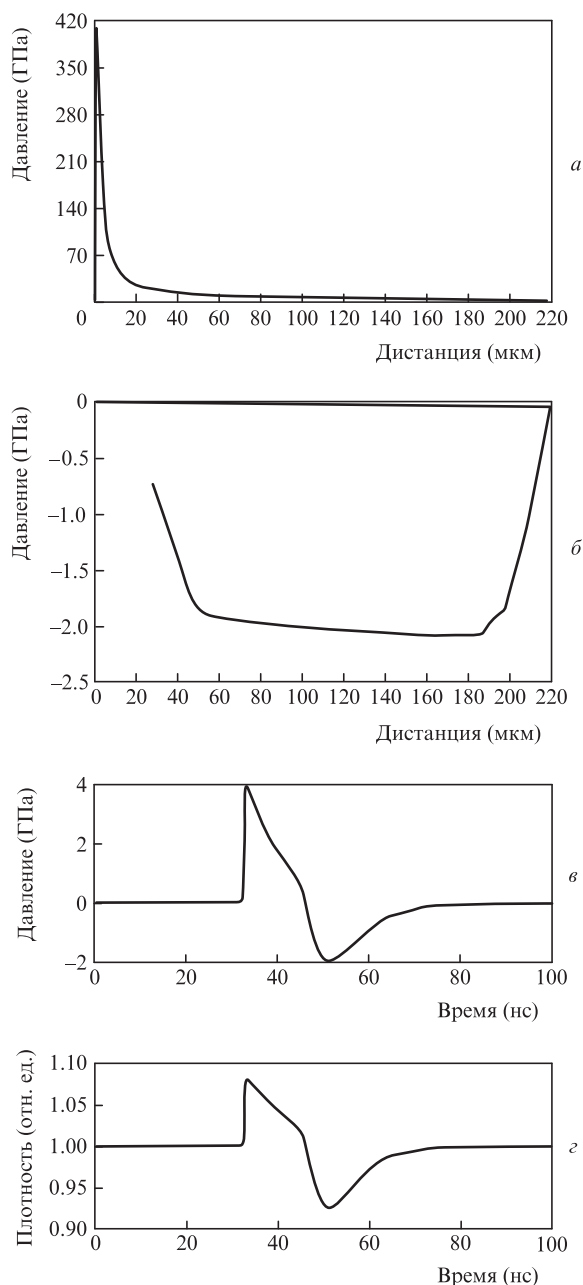


Рис.3. Результаты расчетов по данным эксперимента 1: распределение максимальных (а) и минимальных (б) величин давления по толщине мишени, а также изменение во времени давления (в) и степени сжатия (относительной плотности) (з) в плоскости откола.

зависимости плотности от времени $\rho(t)$ (рис.3,з) путем ее дифференцирования по времени: $\dot{V}/V_0 = |\dot{\rho}(t)/\rho_0|$.

4. Полученные результаты

4.1. Морфология откольной поверхности мишеней

На рис.4 вверху приведены РЭМ-изображения с разным увеличением тыльной (откольной) стороны образца 1 после ударно-волнового воздействия. В опыте 6 произошел откол, но при этом откольная пластинка не отделилась от мишени и тем самым сохранилась для дальнейшего анализа. Оптическое изображение этой пластинки показано на рис.4 внизу. Пластинка имеет квазиконическую форму с углом при вершине 120° . Это является существенным

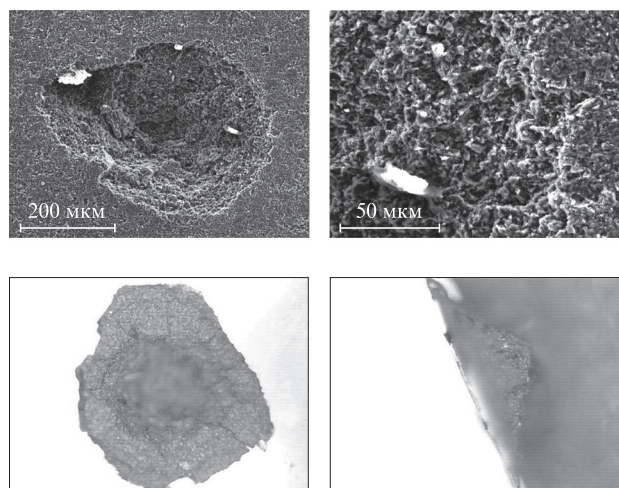


Рис.4. РЭМ-изображения с разным увеличением тыльной (откольной) стороны образца 1 после ударно-волнового воздействия (вверху), а также оптическое изображение с внутренней стороны (слева) и с торца (справа) откольной пластинки, сохранившейся в опыте 6 (угол при вершине откольной пластинки 120°).

отличием от случая металлов, где откольные пластинки имеют плоскую форму [9].

4.2. Структура графита на лицевой и тыльной сторонах мишени

Основной кристаллической фазой графита MF-307 (образцы 1–3) является графит с гексагональной кристаллической структурой. Этот материал наряду с кристаллическими фазами содержит также небольшую часть аморфной компоненты. Образцы из графита PG-5 (образцы 4–6) представляли собой поликристаллический графит с зернами размером ~ 20 нм.

Результаты КР-спектроскопии образцов 4 и 5 графита PG-5 после лазерного воздействия показаны на рис.5 и в табл.2.

На рис.5,а показан КР-спектр исходного образца из графита PG-5. Здесь G-линия КР соответствует положению линии КР монокристаллического графита, а D-линия КР появляется за счет конечных размеров кристаллитов, разупорядоченности и возможных дефектов в образце, D'-линия КР, как правило, сопутствует появлению линии D.

На рис.5,б приведены спектры КР, полученные в опыте 4 в области лазерного воздействия на лицевой поверхности мишени. Кривая 2 соответствует центру кратера,

Табл.2. Характеристики линий КР-спектров образцов из графита PG-5.

Образец	I_D/I_G	Δ_G (см $^{-1}$)	Δ_D (см $^{-1}$)
Исходный	0.59	24.5	47.8
4 (зона лазерного воздействия, край кратера)	0.42	51.4	100
4 (зона лазерного воздействия, центр кратера)	0.31	27.7	51.1
5 (зона лазерного воздействия, центр кратера)	0.25	32.1	89.9
5 (зона откольного кратера)	0.12	21.4	50

Примечания: I_D/I_G – отношение интенсивностей спектральных линий D и G; Δ_G и Δ_D – ширины линий D и G по полувысоте.

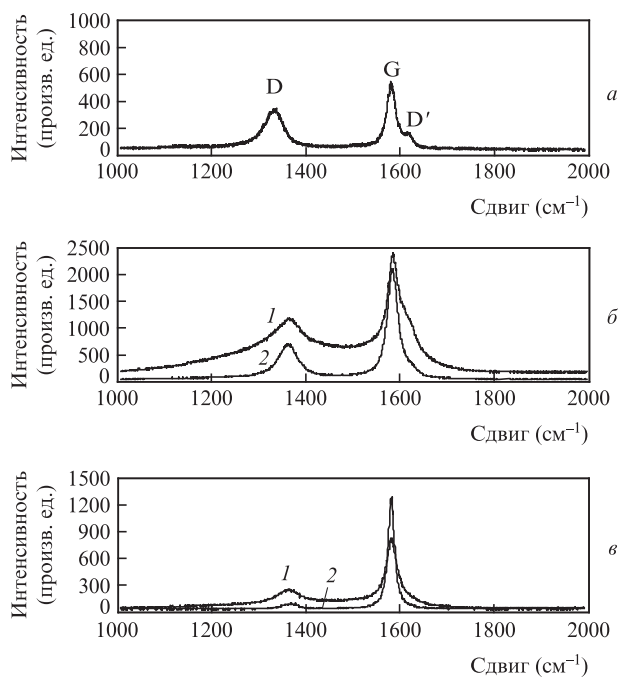


Рис.5. Спектры КР для мишени из PG-5: вне области лазерного воздействия (а), в опыте 4 на лицевой поверхности мишени в области лазерного воздействия на краю (1) и в центре (2) зоны воздействия (б), в опыте 5 в области лазерного воздействия на лицевой поверхности мишени (1) и в зоне откольного кратера на тыльной поверхности мишени (2) (в).

кривая 1 – его краю. На основе анализа этих спектров можно сделать следующие выводы. В центре кратера вещество является графитом с совершенной структурой, возникшей в результате рекристаллизации исходного материала. На краю кратера вещество вероятнее всего обладает разупорядоченной структурой графита, характерной для турбостратной формы углерода, приближенной к структуре сажи.

На рис.5,в представлены спектры КР, зарегистрированные в опыте 5 в области лазерного воздействия на лицевой поверхности мишени (кривая 1) и в области откольного кратера на тыльной поверхности мишени (кривая 2). Спектр КР в зоне откола указывает на очень хорошо перекристаллизованную структуру графита с небольшой разупорядоченностью и большей степенью кристалличности по сравнению с исходным материалом.

4.3. Зависимость откольной прочности графитовых образцов от скорости деформирования

На рис.6 приведена зависимость откольной прочности σ^* графита от скорости деформирования \dot{V}/V_0 . Данные аппроксимируются методом наименьших квадратов кривой, описываемой выражением $\sigma^* = 6.7 \times 10^{-2} (\dot{V}/V_0)^{0.36}$. Неточности в определении откольной прочности σ^* и скорости деформирования \dot{V}/V_0 связаны главным образом с конечной шириной зоны откола. Анализ полученных экспериментальных данных и результатов расчетов показывает, что максимальные погрешности в определении откольной прочности и скорости деформирования составляют 5% и 38% соответственно. В экспериментах получена откольная прочность $\sigma^* \approx 2.1$ ГПа, что составляет 64% от теоретического предела прочности графита 3.27 ГПа, рассчитанного по уравнению состояния [7].

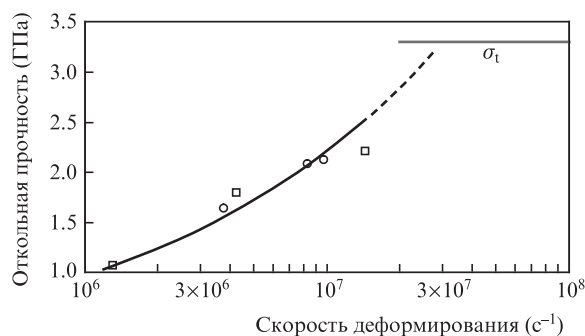


Рис.6. Зависимость откольной прочности графита от скорости деформирования, измеренная на установках «Камертон-Т» (○) и PHELIX (□).

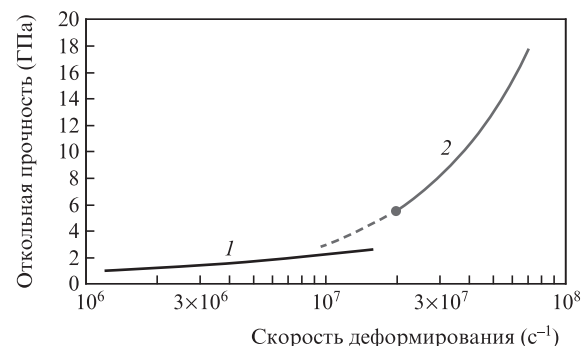


Рис.7. Динамические прочности графита (1) и синтетического алмаза (2) [10]. Штриховая кривая – продолжение экспериментальной кривой 2 в область скоростей деформирования, лежащих ниже границы изученного в [10] диапазона (●).

На рис.7 представлены данные по динамической прочности графита и синтетического алмаза [10]. Видно, что при скорости деформирования 10^7 с⁻¹ откольные прочности графита и алмаза, предположительно, могут совпадать. Однако это требует дополнительного измерения откольной прочности алмаза при скоростях деформирования $(1-1.2) \times 10^7$ с⁻¹.

5. Заключение

Основной результат выполненных исследований состоит в том, что впервые получены данные по динамической прочности графита при скоростях деформирования 10^6-10^7 с⁻¹. Достигнутая максимальная откольная прочность $\sigma^* \approx 2.1$ ГПа составляет 64% от теоретического предела прочности этого вещества. Полученные спектры КР указывают на изменение кристаллической структуры графита, по сравнению с исходной, как на лицевой поверхности мишени в зоне лазерного воздействия, так и на ее тыльной стороне в зоне откола.

Авторы выражают благодарность А.И.Савватимскому за предоставление образцов из графита MF-307, а также Р.О.Гаврилину, С.М.Савину, А.В.Богданову, В.А.Панюшкину, А.В.Бахмутовой, А.П.Кузнецову и К.Л.Губскому за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №12-02-00625, 12-02-00746, 13-02-91057, 14-08-00967 и 14-29-06099, грантов Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ №НШ-451.2014.2 и НШ-6614.2014.2, а также программ Президиума РАН (№13П «Экстремальные световые поля и их приложе-

ния» и 2П «Вещество при высоких плотностях энергии»). Мы благодарны за поддержку программе FP7 EuCARD-2 (грант № 312453) и Федеральному министерству образования и научных исследований (BMBF) Германии.

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* (М.: Физматлит, 2008).
2. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортгов В.Е. *Ударно-волновые явления в конденсированных средах* (М.: Янус-К, 1996).
3. Levashov P.R., Khishchenko K.V., Lomonosov I.V., Fortov V.E. *Proc. Conf. Shock Compression of Condensed Matter-2003* (Melville, NY, AIP, 2004, p. 87); <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/>, <http://www.ficp.ac.ru/rusbank/>.
4. McQueen R.G., March D. *J. Appl. Phys.*, **33** (2), 654 (1962).
5. Батани Д., Вовченко В.И., Канель Г.И. и др. *Докл. РАН*, **389** (3), 328 (2003).
6. Куликовский А.Г., Погорелов Н.В., Семенов А.Ю. *Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений* (М.: Физматлит, 2012).
7. Ломоносов И.В., Фортгов В.Е., Хищенко К.В. *Химическая физика*, **14** (1), 47 (1995).
8. Вовченко В.И., Красюк И.К., Пашинин П.П., Семенов А.Ю. *Докл. РАН*, **338** (3), 322 (1994).
9. Абросимов С.А., Бажулин А.П., Воронов В.В. и др. *Квантовая электроника*, **43** (3), 246 (2013).
10. Абросимов С.А., Бажулин А.П., Большаков А.П. и др. *Квантовая электроника*, **44** (6), 530 (2014).