

## Генерация ударных волн в материаловедческих экспериментах на установках плазменный фокус

С. В. Латышев, В. А. Грибков, С. А. Масляев, В. Н. Пименов,  
М. Падух, Э. Желиньска

---

Представлены результаты численного моделирования и экспериментального наблюдения образования ударной волны (УВ) в материале мишени на основе железа при воздействии на нее мощного импульсного потока ионов, создаваемого в установке плазменный фокус (ПФ). Впервые в материаловедческом эксперименте на установке ПФ-1000 зарегистрирована УВ, прошедшая через стальную мишень. Интерференционным методом была определена амплитуда давления УВ, которая составила 16 ГПа. Наблюдаемое значение амплитуды давления УВ хорошо согласуется с результатами численного моделирования распространения УВ в облученной мишени.

**Ключевые слова:** ударная волна, мощный импульсный поток ионов, плазменный фокус, материаловедческие эксперименты.

---

### Введение

Известно, что прохождение ударных волн (УВ) через материал приводит к изменению его структуры и свойств и проявляется как на микро-, так и на макроуровне. В первом случае на фронте УВ генерируются различные типы точечных и линейных дефектов (вакансии, каскады вакансий, пары Френкеля, дислокации, скопления дислокаций и т.п.), происходят полиморфные превращения [1 – 5]. Во втором случае наблюдаются специфические “макро-эффекты дальнего действия” [6 – 8] — аномально высокий массоперенос компонентов в направлении вектора падающего потока энергии, образование центров динамического разрушения материала, разрушение задней стенки образца-мишени посредством откола и др.

Генерация УВ может осуществляться при воздействии на поверхность мишени интенсивных импульсных ионных, электронных, лазерных пучков, а также лайнеров, разогнанных при взрывах [9].

Представленный в данной работе метод численного моделирования образования в материале УВ развивает концепцию, предложенную в работе [10], и применен для условий генерации УВ в образцах-

мишенях при их облучении в установках ПФ в максимально жестком режиме.

Цель данной работы — рассмотрение методом численного моделирования условий образования УВ в материале мишени на основе железа при воздействии на его поверхность мощного импульсного пучка ионов, генерируемого в установке ПФ, и сопоставление результатов численного расчета с экспериментальными данными, полученными при импульсном облучении образцов аустенитной стали в установке ПФ-1000.

### Численное моделирование экспериментов в установках ПФ

При обрыве тока в установках ПФ генерируются мощные пучки высокоэнергетических ионов со средней энергией ионов  $E_i \sim 100$  кэВ, длительностью импульса  $\tau \sim 10 - 100$  нс и плотностью потока энергии в интервале  $q \sim 10^6 - 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> [11]. При воздействии таких пучков с высокой плотностью потока энергии  $q \sim 10^{10} - 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> на твердотельные мишени у поверхности последних вследствие “взрывного испарения” образуется вторичная плазма с температурой  $T \sim 10 - 50$  эВ и давлением  $P \sim 1 - 100$  ГПа

[12]. Воздействие столь высоких давлений на поверхность материала мишени приводит к образованию и распространению УВ вглубь мишени по ее объему.

В настоящей работе проведен анализ этого процесса методом численного моделирования. В отличие от [10], в которой рассматриваемый процесс анализировали для более мягкого режима облучения ( $q \sim 10^9 - 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau \sim 50$  нс), в данной работе исследованы более жесткие условия облучения ( $q \sim 10^{10} - 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau \sim 10 - 100$  нс). Метод расчета, предложенный в данной работе, опирается на теоретическую модель, представленную в [12, 13] и дополненную уравнением состояния в холодном веществе. При выборе уравнения состояния использовали данные [14 – 16], в которых это уравнение задается в различном виде: в форме ударной адиабаты [14, 15], а также в виде соотношений Ми-Грюнаизена и Мурнагана [16].

Результаты расчета амплитуды давления УВ в объеме мишени из железа, полученные с использованием различных уравнений состояния [14 – 16], представлены на рис. 1. На нем изображены зависимости давления УВ, генерируемой в объеме материала при воздействии на поверхность мишени пучка ионов дейтерия, от расстояния. При расчетах использовали следующие данные: средняя энергия ионов дейтерия  $E_i = 100$  кэВ, их пробег в материале мишени  $d = 1$  мкм [16], плотность потока энергии ионного пучка  $q = 250$  ГВт/см<sup>2</sup>, длительность ионного импульса  $\tau = 100$  нс. Результаты, приведенные на рисунке, соответствуют моменту времени  $t = 110$  нс от начала действия ионного пучка. Форму импульса ионного пучка во всех расчетах, представленных в настоящей работе, задавали в виде синусоиды  $q(t) = q_0 \sin(\pi t / \tau)$ , для которой  $q(t) = 0$  при  $t < 0$  и  $t > \tau$ .

Кривая 1 на рис. 1 рассчитана с использованием уравнения состояния в холодном веществе в форме ударной адиабаты [14]:

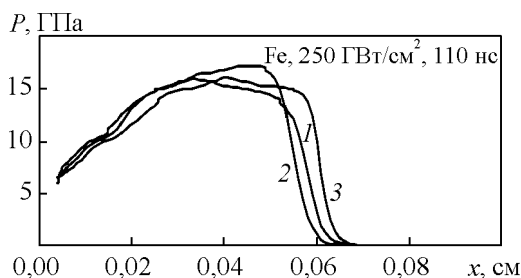


Рис. 1. Зависимость давления УВ, генерируемой при импульсном разряде в ПФ, от расстояния при ее распространении в объеме железа: 1 – ударная адиабата [14], 2 – формула Ми-Грюнаизена [16], 3 – формула Мурнагана [16].

$$P = \frac{A^2 \rho \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)}{(B-1)^2 \left[ \frac{B}{B-1} - \frac{\rho}{\rho_0} \right]^2}, \quad (1)$$

где  $\rho$  и  $\rho_0$  плотности вещества в состоянии сжатия ударной волной и в нормальном состоянии, соответственно. Коэффициенты  $A$  и  $B$ , связывающие скорость  $D$  фронта УВ с массовой скоростью  $u$  вещества за фронтом соотношением  $D = A + Bu$ , брали из работы [15].

Кривые 2 и 3 рассчитаны с использованием данных работы [16] по формулам Ми-Грюнаизена (2) и Мурнагана (3):

$$P = a \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{2/3} \exp \left[ b \left( 1 - \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/3} \right) \right] - c \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{m/3} + 3 \Gamma \frac{\rho}{\mu} RT, \quad (2)$$

$$P = \frac{K}{K'} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{K'} - 1 \right], \quad (3)$$

где  $a, b, c, m, \Gamma, K, K'$  — табличные коэффициенты,  $\mu$  — молярная масса,  $R$  — газовая постоянная.

Из кривых, приведенных на рис. 1, видно, что амплитуды давления УВ и скорости движения фронта различаются не более чем на 15 %. Дальнейшие расчеты величины давления УВ проведены с использованием уравнения состояния вещества в форме ударной адиабаты (1), что обусловлено двумя факторами. Во-первых, в отличие от формул (2) и (3), формула (1) не является эмпирической, а получена из законов сохранения массы и импульса на фронте УВ. Во-вторых, в [15] имеется богатый экспериментальный материал по зависимости скорости движения  $D$  фронта УВ от массовой скорости  $u$  для различных веществ, в том числе для железа. Кроме того, формула Мурнагана не учитывает тепловую составляющую давления и ее можно использовать только при давлениях не свыше 50 ГПа, когда тепловая составляющая не превышает 20%.

С другой стороны, оценку средней величины амплитуды давления в УВ можно получить из оценки абляционного давления в пристеночной плазме, исходя из следующих соображений. При плотностях потока энергии пучка ионов, рассматриваемых в данной работе, происходит быстрый нагрев поверх-

ностного слоя мишени до температуры выше критической на глубину, равную примерно пробегу ионов в материале мишени. Далее происходит “взрывное” испарение этого слоя с образованием перед облученной поверхностью вторичной плазмы из материала мишени и ее разлет под действием собственного давления [12]. Связь между характерной скоростью разлета  $V$  и средним давлением вторичной плазмы в одномерном приближении можно получить из вто-

рого закона Ньютона:  $\frac{d\rho_0 V}{\tau} \sim P$ . Кроме того, как показывает анализ, энергия падающего ионного пучка примерно в равных пропорциях расходуется на кинетическую энергию разлетающегося в виде вторичной плазмы поверхностного слоя мишени и на процессы, связанные с ионизацией, излучением и теплопроводностью облучаемого материала. Другими словами, справедливо примерное равенство  $q_0 \tau \sim d\rho_0 V^2$ . Отсюда, с учетом обоих соотношений, получаем

оценку абляционного давления  $P \sim \sqrt{\frac{q_0 \rho_0 d}{\tau}}$ . Полагая, что функциональная зависимость давления в УВ от основных параметров пучка и мишени такая же и, выбирая в качестве числового коэффициента 1 из соображений наилучшего согласования с результатами численного счета, получаем аналитическую оценку амплитуды УВ:

$$P_A \approx \sqrt{\frac{q_0 \rho_0 d}{\tau}}. \quad (4)$$

Результаты расчета генерации УВ в материале мишени из железа под действием ионного пучка дейтерия со средней энергией ионов 50 – 200 кэВ в установках ПФ представлены в табл. 1. Кроме величины  $P_A$ , в табл. 1 приведены значения амплитуды ударной волны  $P_{УВ}$ , соответствующие завершающей временной фазе импульса ионов (при  $t = \tau$ ) и найденные методом численного моделирования. При этом

пробег ионов дейтерия в железе для выбранного интервала энергий варьировался в пределах  $d \sim 1/3 - 3$  мкм. Значение  $q_0$  в табл. 1 соответствует максимальной плотности потока энергии пучка ионов, а параметр  $T$  — температуре вторичной плазмы мишени, достигаемой в момент максимума плотности потока энергии.

Из табл. 1 видно, что значения  $P_A$  достаточно хорошо согласуются с соответствующими значениями  $P_{УВ}$  — максимальная разница между ними составляет 30%. Этот факт подчеркивает корректность использования формулы (4) для оценки величины амплитуды давления в УВ, генерируемой в материале в рассматриваемых условиях облучения. Кроме того, результаты, приведенные в табл. 1, указывают на существенную зависимость величины  $P_{УВ}$  от параметров облучения — плотности потока энергии и длительности импульса энергии: величина  $P_{УВ}$  заметно возрастает с ростом значений  $q_0$  и сокращением времени  $\tau$ . При этом максимальное значение  $P_{УВ}$  (для  $q_0 = 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> и  $\tau = 10$  нс) составляет  $\sim 100$  ГПа.

### Экспериментальное наблюдение УВ

Экспериментальное изучение ударно-волновых явлений проведено нами методом лазерной интерферометрии плазмы. Эта методика аналогична той, которая была применена нами для исследования динамики плазмы ПФ методом 16-кадровой лазерной интерферометрии с экспозицией каждого кадра 1 нс и временными промежутками между кадрами 10 или 20 нс [17]. В материаловедческих экспериментах на установке ПФ-1000 на полученных интерферограммах наблюдалось распространение УВ в рабочем газе с тыльной (необлученной) стороны мишени (рис. 2). В качестве мишени использовали стальную пластину больших размеров (30 × 30 см), которую размещали в камере ПФ нормально к

Таблица 1

Расчет давления УВ в железе для различных условий эксперимента в ПФ

Плотность мощности, $q_0$ , Вт/см <sup>2</sup>	Длительность импульса, $\tau$ , нс	Глубина пробега ионов $d$ , мкм	Температура плазмы, $T$ , эВ	Амплитуда УВ (аналитическая формула), $P_A$ , ГПа	Давление УВ в момент времени $t = \tau$ $P_{УВ}$ , ГПа
$10^{10}$	10	1	5,5	9	9
$10^{11}$	10	1	19	28	30
$10^{12}$	10	1	48	89	100
$10^{10}$	100	1	14	3	3
$10^{11}$	100	1	28	9	11
$10^{12}$	100	1	52	28	40
$10^{11}$	100	1/3	28	5,1	6,9
$10^{11}$	100	1	28	8,9	9,5
$10^{11}$	100	3	25	15	15

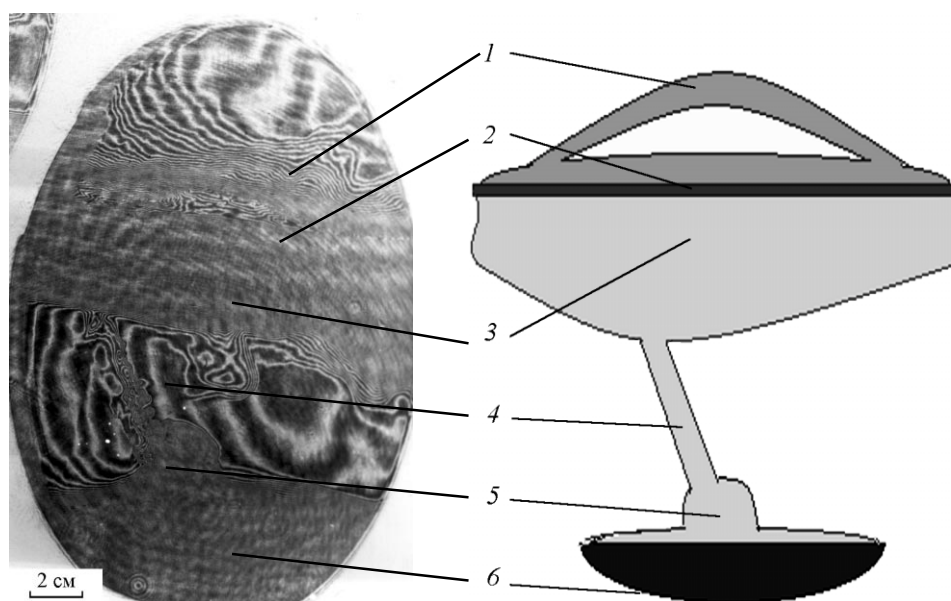


Рис. 2. УВ с тыльной стороны мишени, визуализированная на 10-й мкс после момента обрыва тока: *a* — лазерная интерферограмма; *b* — графический рисунок, поясняющий детали изображения на лазерной интерферограмме. 1 — ударная волна с обратной стороны мишени, 2 — мишень (пластина), 3 — вторичная плазма от мишени (воздействие ионного пучка), 4 — пост-пинч, 5 — вторичная плазма от анода (воздействие электронного пучка), 6 — анод ПФ-1000.

падающему потоку энергии, что исключало обтекание ее плазмой пинча. Пластина располагалась на расстоянии  $L = 10$  см от анода установки, а толщина пластины составляла  $h = 2$  мм.

Применённая в данном эксперименте методика интерферометрии плазмы позволила получить в одном импульсном разряде установки ПФ-1000 16 кадров-интерферограмм. Каждый кадр был получен с длительностью экспозиции в 1 нс, а полный охват интервала времени за всю продолжительность 16-ти кадров составлял 220 нс. Ниже приведен 1 кадр из полученного 16-ти кадрового набора, поскольку видимой разницы между интерферограммами этой серии, соответствующей вышеуказанному интервалу времени, не наблюдается.

Интерферограмма, представленная на рис. 2, снята через 10 мкс после обрыва тока. На данной интерферограмме видно, что за это время полусферическая УВ в рабочем газе ушла от тыльной стороны мишени примерно на 1,5 см, что соответствует скорости фронта УВ  $D = 1,5$  км/с (отметим, что скорость звука в дейтерии при температуре  $0^\circ\text{C}$  равна  $0,89$  км/с [16]).

Наблюдаемую УВ в рабочем газе в области тыльной стороны мишени генерировала “исходная” УВ, прошедшая через мишень. Тыльная сторона стальной пластины, по отношению к расположенному за ней рабочему газу, сыграла роль поршня, скорость которого (учитывая эффект удвоения

скорости при выходе УВ на поверхность твердого тела [14]) равна удвоенной массовой скорости УВ в стальной мишени. Используя известные формулы газовой динамики [14], можно рассчитать скорость поршня, а, следовательно, и массовую скорость  $u$  из следующего соотношения

$$u = D \frac{\beta - \gamma}{\beta(\gamma + 1)}, \quad (5)$$

где  $\beta = \frac{D^2 m_D}{kT_0}$ ,  $m_D$  — масса молекулы рабочего газа

(дейтерия),  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_0 = 300$  К (комнатная температура),  $\gamma$  — показатель адиабаты, который для дейтерия, с учетом поступательных и вращательных степеней свободы, равен  $7/5$  (колебательные степени свободы в условиях эксперимента не возбуждаются).

Рассчитана по приведенным формулам массовая скорость УВ в стальной пластине  $u = 0,4$  км/с. По данным [18] в железе при давлении около 13 ГПа возможен фазовый переход из состояния с ОЦК решеткой в состояние с ГЦК решеткой ( $\alpha \rightarrow \gamma$ ), а при более высоких значениях  $P$  допустим фазовый переход в состояние с ГПУ решеткой ( $\alpha \rightarrow \epsilon$ ), а также переход  $\epsilon \rightarrow \gamma$ . Согласно данным работы [15], это происходит при массовых скоростях в УВ  $u \approx 0,3 - 0,8$  км/с, причем в этом диапазоне массовых скоростей зависимость  $D(u) \approx \text{const} \approx 5,2$  км/с. Учитывая,

что в конденсированных средах давление в УВ рассчитывается по формуле  $P = \rho_0 D u$ , получаем для нашего случая приближенное значение давления УВ в стальной пластине  $P \approx 16$  ГПа.

Экспериментально найденное значение  $P \approx 16$  ГПа хорошо согласуется с результатами численного моделирования, приведенными для ионного пучка дейтерия с энергией дейтронов  $E_i = 100$  кэВ, их пробегом в железе  $d = 1$  мкм, длительностью импульса быстрых дейтронов  $\tau = 100$  нс и плотностью потока энергии  $q = 250$  ГВт/см<sup>2</sup>, что соответствует условиям нашего эксперимента, проведенного в установке ПФ-1000.

## Выводы

1. Методом численного моделирования, развитым в работе, рассчитаны давления на фронте УВ, образующейся в материале мишени на основе железа при воздействии на нее импульсных пучков ионов дейтерия с энергией дейтронов  $E_D \sim 100$  кэВ, плотностью потока энергии пучка на поверхности мишени  $q \sim 10^{10} - 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> и длительностью импульсов в интервале  $\tau \sim 10 - 100$  нс.

2. Методом лазерной интерферометрии плазмы экспериментально зафиксировано распространение УВ в рабочем газе с тыльной (необлученной) стороны стальной пластины-мишени после ее прохождения через объем материала мишени, облученной мощными импульсными потоками ионов дейтерия в установке Плазменный фокус ПФ-1000. Найденная из эксперимента величина амплитуды давления УВ в стальной мишени составила 16 ГПа. Результаты эксперимента и численных расчетов хорошо согласуются между собой.

3. Полученные результаты показывают перспективность использования установок Плазменный фокус в материаловедческих экспериментах по исследованию воздействия УВ с амплитудами до 100 ГПа на микроструктуру материалов различного вида и назначения. Для этих целей не требуются установки с большим потреблением энергии, более важная технологическая задача — уменьшение длительности импульса ионного пучка. Представляется, что установки ПФ с энергозапасом батареи 3 – 10 кДж и длительностью импульса ионного тока 10 – 20 нс вполне могут конкурировать с установками существенно большего энергозапаса (типа ПФ-1000 с энергетикой  $\sim 1$  МДж).

*Данная работа поддержана грантами МАГАТЭ №№ RC-16932, RC-16954, RC-16955, RC-16956, 16960 и MC-17167.*

## Литература

1. Бондаренко Г.Г., Иванов Л.И., Янушкевич В.А. Воздействие гигантских импульсов лазера на микроструктуру алюминия. Физика и химия обработки материалов, 1973, № 4, с. 19 – 21.
2. Лариков Л.Н., Фильченко В.М., Мазанко В.Ф. Аномальное ускорение диффузии при импульсном нагружении металлов. Докл. АН СССР Серия математика и физика, 1975, т. 221, № 5, с. 1073 – 1075.
3. Иванов Л.И., Литвинова Н.А., Янушкевич В.А. Аномальное распределение плотности точечных дефектов, образующихся в поглощающем материале при лазерном облучении. Физика и химия обработки материалов, 1976, № 2, с. 3 – 6.
4. Иванов Л.И., Литвинова Н.А., Янушкевич В.А. Глубина образования ударных волн при воздействии лазерного излучения на поверхность монокристалла молибдена. Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 1, с. 204 – 206.
5. Канель Г.И., Разорёнов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996, 408 с.
6. Бонюшкин Е.К., Завада Н.И., Новиков С.А., Учаев А.Я. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева. Саров, РФЯЦ ВНИИЭФ, Труды ученых ядерных центров России №3, 1998, 275 с.
7. Диденко А.Н., Шаркеев Ю.П., Козлов Э.В., Рябчиков А.И. Эффекты дальнего действия в ионно-имплантированных металлических материалах. Томск: Изд-во НТЛ, 2004, 328 с.
8. Боровицкая И.В., Иванов Л.И., Дедюрин А.И., Крохин О.Н., Никулин В.Я., Тихомиров А.А. Воздействие высокотемпературной импульсной дейтериевой плазмы на ванадий. Перспективные материалы, 2003, № 2, с. 24 – 28.
9. Фортвов В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества. Успехи физических наук, 2007, т. 177, № 4, с. 347 – 368.
10. Масляев С.А. Численное моделирование ударных волн в твердом теле при воздействии концентрированных потоков энергии. Физика и химия обработки материалов, 2013, № 5, с. 5 – 9.
11. Gribkov V.A., Pimenov V.N., Ivanov L.I., Dyomina E.V. et al. Interaction of high temperature deuterium plasma streams and fast ion beams with condensed materials in dense plasma focus device. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, v. 36, pp. 1817 – 1825.
12. Грибков В.А., Латышев С.В., Масляев С.А., Пименов В.Н. Численное моделирование взаимодействия импульсных потоков энергии с материалами в установках Плазменный фокус. Физика и химия обработки материалов, 2011, № 6, с. 16 – 22.
13. Латышев С.В. Численное моделирование взаимодействия лазерного излучения с плоскими мишенями. Препринт ИТЭФ, 1983, № 66, 20 с.
14. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966, 688 с.

15. Трунин Р.Ф. Исследование экстремальных состояний конденсированных веществ методом ударных волн, Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, 286 с.
16. Физические величины. Справочник под редакцией И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
17. Kubes P., Paduch M., Piszarczyk T., Scholz M., Chodukowski T., Klir D., Kravarik J., Rezac K., Ivanova-Stanik I., Karpinski L., Tomaszewski K., Sadowski M.J. Interferometric study of pinch phase in a plasmafocus device at the time of neutron production, IEEE Trans. Plasma Sci., 2009, v. 37, no. 11, pp. 2191 – 2196.
18. Орленко Л.П. Физика взрыва. Т.2. Под редакцией Орленко Л.П. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002, 654 с.
1. Bondarenko G.G., Ivanov L.I., Yanushkevich V.A. Vozdeystviye gigantских импульсов лазера на микроструктуру алюминия [Effect of giant laser pulses on aluminum microstructure]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 1973, no.4, pp. 19 – 21.
2. Larikov L.N., Filchenko V.M., Mazanko V.F. Anomalnoye uskoreniye diffuzii pri impulsnom nagruzhении metallov [Anomalous enhance of diffusion in metals under impact loading]. *Dokl. AN SSSR Seriya matematika i fizika — Doklady Academy of Science. Mathematics. Physics*, 1975, vol. 221, no. 5, pp. 1073 – 1075.
3. Ivanov L.I., Litvinova N.A., Yanushkevich V.A. Anomalnoye raspredeleniye tochechnykh defektov, obrazuyushchikhsya v pogloshchayushchem materiale pri lazernom obluchenii [Abnormal distribution of density of point defects formed in absorbing material by laser irradiation]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 1976, no. 2, pp. 3 – 6.
4. Ivanov L.I., Litvinova N.A., Yanushkevich V.A. Glubina obrazovaniya udarnykh voln pri vozdeystvii lazernogo izlucheniya na poverkhnost monokristalla molibdena [Depth of shock waves formation on molybdenum single crystal surface under laser radiation]. *Kvantovaya elektronika — Quantum Electronics*, 1977, vol.4, no. 1, pp. 204 – 206.
5. Kanel G.I., Razoryonov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. Udarno-volnovoye yavleniya v kondensirovannykh sredakh [Shock-wave phenomena in condensed media]. Moscow, Yanus-K Publ., 1996, 408 p.
6. Bonyushkin Ye.K., Zavada N.I., Novikov S.A., Uchayev A.Ya. Kinetika dinamicheskogo razrusheniya metallov v rezhime impulsnogo obyemnogo razogreva [Kinetics of dynamic metals fracture under pulse volume heating]. Sarov, Russia, Inst. Experimental Physics, *Trudy uchenykh yadernykh tsentrov Rossii — Reports of scientists of Russian nuclear centers*, 1998, no. 3, 275 p.
7. Didenko A.N., Sharkeyev Yu.P., Kozlov E.V., Ryabchikov A.I. Effekty dalnodeystviya v ionno-implantirovannykh metallicheskiykh materialakh [Long-range effects in ion-implanted metal materials]. Tomsk, Russia, NTL Publ., 2004, 328 p.
8. Borovitskaya I.V., Ivanov L.I., Dedyurin A.I., Krokhin O.N., Nikulin V.Ya., Tikhomirov A.A. Vozdeystviye vysokotemperaturnoy impulsnoy deuteriyevooy plazmy na vanady [Effect of high temperature deuterium plasma on vanadium]. *Perspektivnyye materialy — Advanced materials*, 2003, no. 2, pp. 24 – 28.
9. Fortov V.E. Moshchnye udarnye volny i ekstremalnye sostoyaniya veshchestva [Intense shock waves and extreme state of matter]. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Physics Uspekhi*, 2007, vol. 177, no. 4, p. 347 – 368.
10. Maslyayev S.A. Chislennoye modelirovaniye udarnykh voln v tverdom tele pri vozdeystvii kontsentririrovannykh potokov energii [Numerical simulation of shock waves in solids under concentrated energy fluxes effect]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 2013, no. 5, p. 5 – 9.
11. Gribov V.A., Pimenov V.N., Ivanov L.I., Dyomina E.V. et al., Interaction of high temperature deuterium plasma streams and fast ion beams with condensed materials in dense plasma focus device. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, vol. 36, pp. 1817 – 1825.
12. Gribov V.A., Latyshev S.V., Maslyayev S.A., Pimenov V.N. Chislennoye modelirovaniye vzaimodeystviya impulsnykh potokov energii s materialom v ustanovkakh Plazmennyy focus [Numerical simulation of interaction of pulsed energy flux with material in Plasma Focus installations]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 2011, no. 6, p. 16 – 22.
13. Latyshev S.V. Chislennoye modelirovaniye vzaimodeystviya lazernogo izlucheniya s ploskimi mishenyami [Numerical simulation of interaction of laser radiation with flat targets]. Preprint ITEP, 1983, no. 66, 20 p.
14. Zeldovich Ya.B., Rayzer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy* [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 688 p.
15. Trunin R.F. *Issledovaniye ekstremalnykh sostoyany kondensirovannykh veshchestv metodom udarnykh voln* [Study of condensed substances extreme states by shock waves]. Sarov, Russia, Inst. Experimental Physics Publ., 2006, 286 p.
16. Grigoryeva I.S., Meylikhova Ye.Z. *Fizicheskiye velichiny. Spravochnik* [Physical quantities. Handbook]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 1232 p.
17. Kubes P., Paduch M., Piszarczyk T., Scholz M., Chodukowski T., Klir D., Kravarik J., Rezac K., Ivanova-Stanik I., Karpinski L., Tomaszewski K., Sadowski M.J., Interferometric study of pinch phase in a plasmafocus device at the time of neutron production, IEEE Trans. Plasma Sci., 2009, vol. 37, no. 11, pp. 2191 – 2196.
18. Орленко Л.П. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. vol.2. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002, 654 p.

Статья поступила в редакцию 16.01.2014 г.

*Латышев Сергей Владимирович* — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва), старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, специалист в области физики плазмы и квантовой электроники. E-mail address: latyshevsv@rambler.ru.

*Грибков Владимир Алексеевич* — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва), ведущий научный сотрудник, профессор, доктор физико-математических наук, специалист в области экспериментальной физики плотной плазмы. E-mail address: gribkovv@rambler.ru.

*Масляев Сергей Алексеевич* — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва), старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail address: maslyaev@mail.ru.

*Пименов Валерий Николаевич* — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва), заведующий лабораторией, доктор физико-математических наук. Специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail address: pimval@mail.ru.

*Падух Мариан* — Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза (г. Варшава, Польша), PhD, начальник отдела диагностики плазмы и плазменных технологий, ведущий исследователь, специалист в области горячей плазмы и её диагностики. E-mail address: marian.paduch@ipplm.pl.

*Желиньска Эва* — Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза (г. Варшава, Польша), сотрудник отдела диагностики плазмы и плазменных технологий, исследователь, специалист в области горячей плазмы и её диагностики. E-mail address: ewa.zielinska@ifpilm.pl.

---

## **Generation of the shock waves in the material science experiments with dense Plasma Focus device**

**S. V. Latyshev, V. A. Gribkov, S. A. Maslyaev, V. N. Pimenov, M. Paduch, E. Zielinska**

The paper presents a comparison of the results of numerical simulations of the shock wave (SW), produced inside a stainless steel plate by powerful pulsed stream of fast ions generated in a dense plasma focus device (DPF), with its experimental observations. The SW has been registered for the first time in materials science experiment directly by means of the multi-frame nanosecond laser interferometry. It was visualized in the experiments with the PF-1000 facility after going out of the SW at the rear side of the thin stainless steel plate into the residual gas atmosphere. In particular the pressure amplitude of the SW, measured by interferometric method, was found to be equal to 16 GPa. The observed value agrees well with the results of numerical simulations of the SW pressure amplitude.

**Keywords:** shock wave, powerful pulsed stream of fast ions, plasma focus, materials science experiments.

**Latyshev Sergey** — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, PhD, senior research worker. E-mail address: latyshevsv@rambler.ru

**Gribkov Vladimir** — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, DrSci (Phys.Math.), leading research worker, professor. E-mail address: gribkovv@rambler.ru

**Maslyaeв Sergey** — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, PhD, senior research worker, professor. E-mail address: maslyaeв@mail.ru

**Pimenov Valeriy** — Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, DrSci (Phys.Math.), head of laboratory. E-mail address: pimval@mail.ru

**Paduch Marian** — Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Warsaw, Poland, PhD. E-mail address: marian.paduch@ipplm.pl

**Zielinska Eva** — Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Warsaw, Poland, reseacher. E-mail address: ewa.zielinska@ifpilm.pl