

УДК: 51-72

## Высокоскоростное внедрение. Дискретно-элементное моделирование и эксперимент

К. К. Абгарян<sup>1,а</sup>, С. В. Елисеев<sup>3</sup>, А. А. Журавлев<sup>1,2</sup>, Д. Л. Ревизников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Вычислительный центр им. А. А. Дородницына  
Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук,  
Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, к. 2

<sup>2</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4

<sup>3</sup> Научно-исследовательский машиностроительный институт им. В. В. Бахирева,  
Россия, 125212, г. Москва, Ленинградское шоссе, д. 58

E-mail: <sup>а</sup> abgaryan@ccas.ru

*Получено 04.08.2017.*

*Принято к публикации 29.09.2017.*

В статье представлены результаты численного моделирования и экспериментальные данные по высокоскоростному внедрению ударника в преграду. В расчетах использовалась дискретно-элементная модель, основанная на представлении ударника и преграды совокупностью плотно упакованных взаимосвязанных частиц. Данный класс моделей находит все более широкое применение в задачах высокоскоростного взаимодействия тел. В предыдущих работах авторов рассмотрены вопросы применения дискретно-элементной модели к задаче внедрения металлических шаров в массивные преграды. На основе сравнительного анализа данных вычислительных и физических экспериментов было показано, что для широкого класса задач высокоскоростного внедрения достаточно высокая точность дискретно-элементного моделирования может быть достигнута с использованием двухпараметрического потенциала Леннарда–Джонса. При этом была идентифицирована зависимость энергии межэлементной связи от динамической твердости материалов. Использование построенной таким образом дискретно-элементной модели позволило достаточно точно описать наблюдаемые в экспериментах процессы внедрения ударника в массивную преграду в диапазоне скоростей взаимодействия 500–2500 м/с.

В настоящей работе проводится сравнение результатов дискретно-элементного моделирования с экспериментальными данными по пробитию высокопрочных преград различной толщины стальными ударниками. Использование технологий распараллеливания вычислений на графических процессорах в сочетании со средствами трехмерной визуализации и анимации результатов позволяет получить детальные пространственно-временные картины процесса внедрения и провести сопоставление полученных картин с экспериментальными данными.

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных показал достаточно высокую точность дискретно-элементного моделирования для широкого диапазона толщин преград: для тонких преград, пробиваемых с сохранением цельности деформируемого ударника, для преград средней толщины, пробиваемых с практически полной фрагментацией ударника на выходе из преграды, а также для непробиваемых насквозь преград.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, дискретно-элементная модель, энергия связи, численное моделирование

UDC: 51-72

## High-speed penetration. Discrete-element simulation and experiments

K. K. Abgaryan<sup>1,a</sup>, S. V. Eliseev<sup>3</sup>, A. A. Juravlev<sup>1,2</sup>, D. L. Reviznikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dorodnicyn Computing Centre, Federal Research Center “Computer Science and Control”  
of Russian Academy of Sciences,  
Vavilov st. 44, b. 2, Moscow, 119333, Russia

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National research University),  
Volokolamskoye sh. 4, Moscow, 125993, Russia

<sup>3</sup> Mechanical Engineering Research Institute,  
Leningradskoye sh. 58, Moscow, 125212, Russia

E-mail: <sup>a</sup> abgaryan@ccas.ru

Received 04.08.2017.

Accepted for publication 29.09.2017.

The paper presents the results of numerical simulation and experimental data on the high-speed penetration of the impactor into the obstacle. In the calculations, a discrete-element model has been used, based on the representation of the impactor and the target by a set of close packed interconnected particles. This class of models finds an increasingly wide application in the problems of high-speed interaction of bodies. In the previous works of the authors, the questions of application of the discrete-element model to the problem of the penetration of spherical impactors into massive targets were considered. On the basis of a comparative analysis of the data of computational and physical experiments, it was found out that for a wide class of high-speed penetration problems, a high accuracy of discrete-element modeling can be achieved using the two-parameter Lennard–Jones potential. The binding energy was identified as a function of the dynamic hardness of materials. It was shown that the use of this approach makes it possible to describe accurately the penetration process in the range of impactor velocities 500–2500 m/c.

In this paper, we compare the results of discrete-element modeling with experimental data on penetration of high-strength targets of different thickness by steel impactors. The use of computational parallelization technologies on graphic processors in combination with 3D visualization and animation of the results makes it possible to obtain detailed spatio-temporal patterns of the penetration process and compare them with experimental data.

A comparative analysis of the experimental and calculated data has shown a sufficiently high accuracy of discrete-element modeling for a wide range of target thicknesses: for thin targets pierced with preservation of the integrity of the deformed impactor, for targets of medium thickness, pierced with practically complete fragmentation of the impactor at the exit from the target, and for thick impenetrable targets.

Keywords: high velocity impact, discrete-element model, binding energy, numerical simulation

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 6, pp. 937–944 (Russian).

## 1. Дискретно-элементная модель высокоскоростного взаимодействия ударника и преграды

Сложность математического моделирования высокоскоростного внедрения ударника в преграду связана с необходимостью адекватного описания сложного комплекса взаимосвязанных физико-химических процессов. К ним относятся ударно-волновые явления, сильные деформации, нарушение сплошности материалов и др. [Канель и др., 1996; Фомин и др., 1999; Орленко, 2006]. В инженерной практике применяются как сравнительно простые аналитические и полуэмпирические модели [Ben-Dor et al., 2013; Михатулин и др., 2008; Орленко, 2006], так и более сложные модели континуальной механики [Фомин и др., 1999; Годунов и др., 2014; Блажевич и др., 1999; Острик, 2008]. В последнее время все большее распространение получают дискретные модели, основанные на представлении ударника и преграды совокупностью плотноупакованных взаимосвязанных частиц [Кривцов, 2007]. В статье авторов [Абгарян и др., 2014], продолжением которой является настоящая работа, рассмотрены вопросы применения дискретно-элементной модели к задаче внедрения металлических шаров в массивные преграды.

В методе дискретных элементов рассматривается ансамбль из  $n$  взаимодействующих между собой частиц (дискретных элементов). Движение частиц описывается в рамках классической динамики:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{F}_i,$$

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i.$$

Здесь  $m_i$  — масса  $i$ -й частицы,  $\mathbf{r}_i$  — радиус-вектор,  $\mathbf{F}_i$  — сила, действующая на  $i$ -ю частицу, равная сумме сил, обусловленных взаимодействием с окружающими частицами;  $\mathbf{F}(\mathbf{r}) = -\nabla\Phi(\mathbf{r})$ , где  $\Phi(\mathbf{r})$  — потенциал межчастичного взаимодействия.

Важнейшим вопросом, решаемым в ходе отработки методики дискретно-элементного моделирования, является определение структуры и параметров потенциала  $\Phi(\mathbf{r})$ . В работе [Абгарян и др., 2014] на основе сравнительного анализа данных вычислительных и физических экспериментов [Златин и др., 1974] было показано, что для широкого класса задач высокоскоростного внедрения достаточно высокая точность дискретно-элементного моделирования может быть достигнута с использованием двухпараметрического потенциала Леннарда-Джонса:

$$\Phi(r) = E \left[ \left( \frac{a}{r} \right)^{12} - 2 \left( \frac{a}{r} \right)^6 \right], \quad f(r) = \frac{12E}{a} \left[ \left( \frac{a}{r} \right)^{13} - \left( \frac{a}{r} \right)^7 \right],$$

где  $E$  — энергия связи,  $a$  — длина связи (расстояние, на котором обращается в ноль сила взаимодействия),  $r$  — расстояние между дискретными элементами (частицами).

При этом путем сравнения результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными была идентифицирована зависимость энергии межэлементной связи от динамической твердости материалов [Абгарян и др., 2014]. Использование построенной таким образом дискретно-элементной модели позволило достаточно точно описать наблюдаемые в экспериментах процессы внедрения ударника в преграду в диапазоне скоростей взаимодействия 500–2500 м/с.

В настоящей работе для интегрирования системы уравнений движения взаимодействующих частиц используется метод скоростей Верле второго порядка точности. Согласно этому методу сначала обновляются координаты частиц, затем для новых позиций частиц рассчитываются ускорения (силы, действующие на частицы), после чего по средним за временной ин-

тервал значениям ускорений определяются новые скорости частиц:

$$\mathbf{r}_i^{k+1} = \mathbf{r}_i^k + \tau_k \mathbf{v}_i^k + \frac{\tau_k^2}{2m_i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \mathbf{f}_{ij}(\mathbf{r}_i^k - \mathbf{r}_j^k),$$

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = \mathbf{v}_i^k + \frac{\tau_k}{2m_i} \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \mathbf{f}_{ij}(\mathbf{r}_i^{k+1} - \mathbf{r}_j^{k+1}) + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^n \mathbf{f}_{ij}(\mathbf{r}_i^k - \mathbf{r}_j^k) \right).$$

Здесь  $\mathbf{f}_{ij}$  — сила, с которой  $j$ -й элемент действует на  $i$ -й элемент, зависящая от текущего расстояния между элементами  $r_{ij}$ ;  $\tau_k$  — шаг по времени.

Присутствие неявного элемента при вычислении скоростей (скорость на новом временном слое рассчитывается из ускорения (силы) на новом слое) обуславливает достаточный запас устойчивости данного алгоритма, что позволяет добиться приемлемых вычислительных затрат при расчете высокоскоростного внедрения.

Для повышения эффективности вычислительного процесса используются как традиционные для молекулярной динамики методы усечения потенциала межчастичного взаимодействия, так и специальные приемы ускорения расчетов за счет распараллеливания вычислений на графических процессорах [Ревизников, Семенов, 2013]. К ним относятся методы отображения необходимых для расчетов структур данных на память графического сопроцессора, обеспечивающие принципиально важное для расчетов на GPU свойство локальности запросов к памяти, реализация собственного менеджера памяти, что, благодаря более эффективной работе с запросами на выделение памяти, дает возможность лучше использовать хорошо оптимизированные стандартные алгоритмы. Помимо базовых техник оптимизации кода под графические сопроцессоры, применяется дополнительный шаг, модуль компилируется несколько раз с различными наборами параметров, отвечающих за гранулярность и распределение подзадач на GPU. Кроме того, на специальном наборе тестовых задач осуществляется выбор оптимального варианта компиляции.

Использование технологий распараллеливания вычислений на графических процессорах в сочетании со средствами трехмерной визуализации и анимации результатов позволяет получить детальные пространственно-временные картины процесса внедрения и провести сопоставление полученных картин с экспериментальными данными.

## 2. Сравнительный анализ результатов дискретно-элементного моделирования и экспериментальных данных

В настоящей работе проводится сравнение результатов дискретно-элементного моделирования с экспериментальными данными по пробитию высокопрочных преград стальными ударниками. Свойства материалов следующие: ударник — плотность  $7800 \text{ кг/м}^3$ , предел текучести  $240 \text{ МПа}$ , твердость по Бринеллю равна  $125$ . Преграда: плотность  $7860 \text{ кг/см}^3$ , предел текучести  $1,5 \text{ ГПа}$ , твердость по Бринеллю равна  $440$ .

Геометрическая схема ударника представлена на рис. 1.

Геометрические параметры ударника следующие:  $L = 52 \text{ мм}$ ,  $l_T = 26 \text{ мм}$ ,  $d_3 = 16 \text{ мм}$ ,  $d_T = 12 \text{ мм}$ .

Толщина преграды варьировалась в диапазоне  $5\text{--}50 \text{ мм}$ .

Скорость ударника в момент столкновения с преградой полагалась равной  $2200 \text{ м/с}$ . Столкновение происходит по нормали к поверхности преграды.

В начальный момент времени (до соударения) ударник и преграда представляются плотноупакованными структурами, для чего используются кубические гранецентрированные решетки. Это позволяет, исходя из количества моделирующих частиц  $N$  и объема объекта  $V_s$ , определить равновесное расстояние между частицами  $a$  [Кривцов, 2007]. Для определения энергии

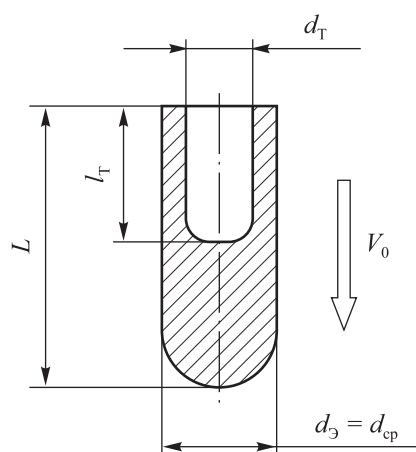


Рис. 1. Конфигурация ударника

связи между однородными элементами использовалась полученная в работе [Абгарян и др., 2014] зависимость энергии от динамической твердости материалов.

Для описания взаимодействия между разнородными элементами используются следующие выражения для энергии и длины связи:  $E_{AB} = \sqrt{E_A E_B}$ ;  $a_{AB} = \frac{a_A + a_B}{2}$ .

В расчетах использовались частицы одинакового размера для ударника и преграды. Согласно проведенным вычислительным экспериментам приемлемое с позиций «точность расчета – вычислительные затраты» количество моделирующих частиц для ударника составляет порядка  $3 \cdot 10^4$ , для преграды — около  $9 \cdot 10^6$ .

Рассмотрим результаты численного моделирования в сравнении с экспериментальными данными. На нижеследующих рисунках показаны экспериментальные рентгенограммы (слева, монохромные изображения) и полученные численно разрезы (справа, цветные изображения) в соответствующие моменты времени.

На рис. 2 представлен вариант относительно тонкой преграды (толщиной 10 мм). Показаны картины, наблюдаемые в моменты подлета ударника к преграде и сразу после пробития. Обращает на себя внимание хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных как в плане разлета выбитого из преграды материала, так и касательно формы ударника после прохождения преграды. Отметим, что некоторые визуальные различия обусловлены различным характером изображения: объемным для экспериментальных рентгенограмм и плоскостным для численных разрезов. Это, однако, не снижает наглядности приводимых иллюстраций.

Рис. 3, 4 соответствуют вариантам преграды средней толщины. Видно, что для толщины преграды 20 мм (рис. 3) остаточная после пробития форма ударника, полученная в численном моделировании, хорошо согласуется с наблюдаемой на рентгенограмме (кадр 3). Это относится и к эволюции формы преграды в области прохождения ударника. При увеличении толщины преграды до 30 мм (рис. 4) ударник по-прежнему пробивает преграду, однако при этом практически утрачивает цельность, распадаясь на относительно мелкие частицы. Этот эффект также хорошо воспроизводится в вычислительном эксперименте.

Рис. 5–7 соответствуют варианту толстой преграды (толщина 45 мм), которая не пробивается насквозь ударником. На рис. 5 показан вид сверху. Здесь слева, как и ранее, представлена экспериментальная картина, а справа — аналогичное изображение, полученное с помощью численного моделирования (монохромное изображение с градиентным разрешением). Видно как качественное, так и количественное (поперечный размер кратера, см. линейку на рисунке) согласование экспериментальной и вычислительной «картин». На рис. 6 показан вид снизу, а на рис. 7 — вид сбоку нижней части преграды (результаты численного моделирования визуализируются с использованием сферических частиц). Здесь также наблюдается хорошее согласование расчетных и экспериментальных результатов.

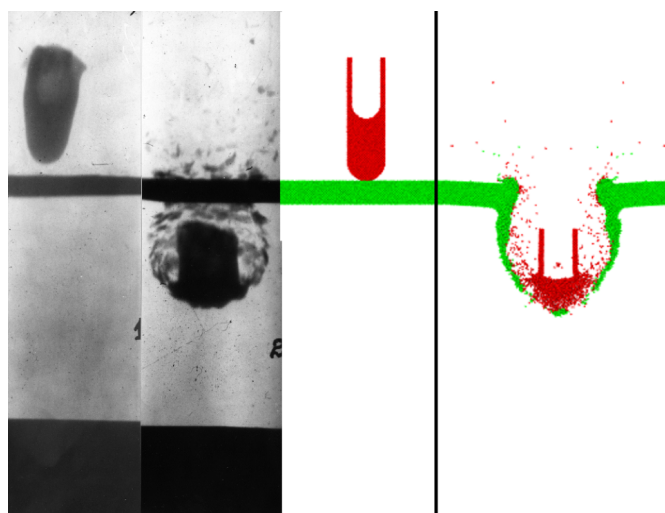


Рис. 2. Пробитие ударником преграды толщиной 10 мм

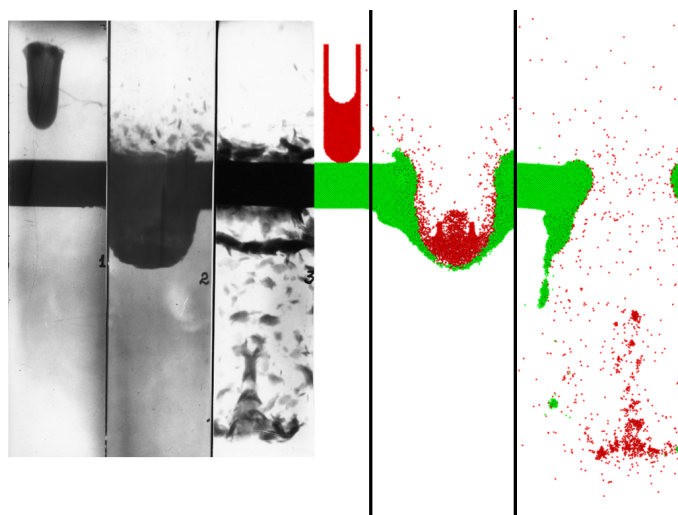


Рис. 3. Пробитие ударником преграды толщиной 20 мм

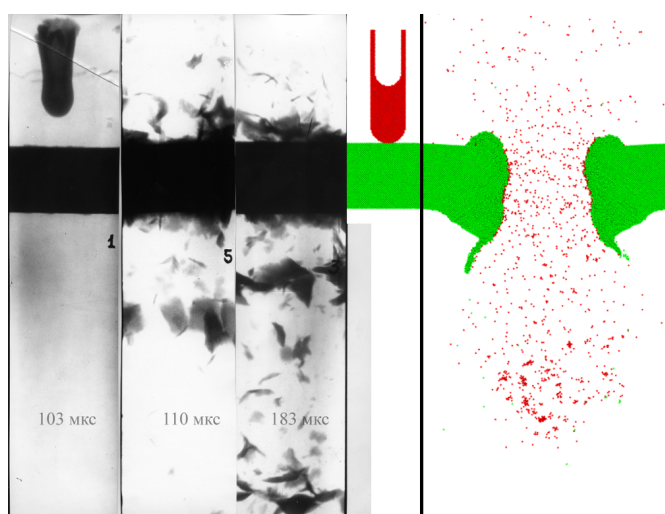


Рис. 4. Пробитие ударником преграды толщиной 30 мм





Рис. 5. Пробитие ударником преграды толщиной 45 мм (вид сверху)

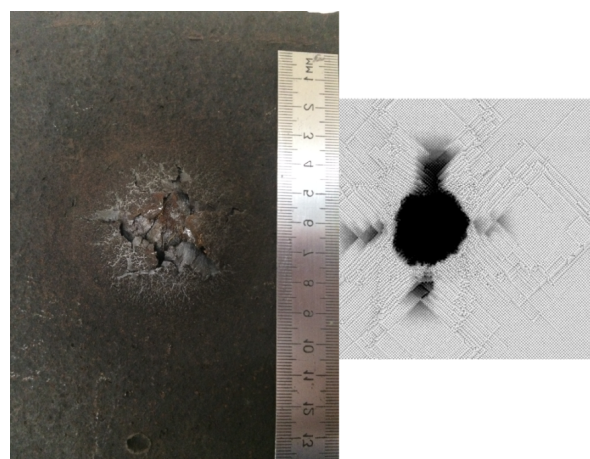


Рис. 6. Пробитие ударником преграды толщиной 45 мм (вид снизу)

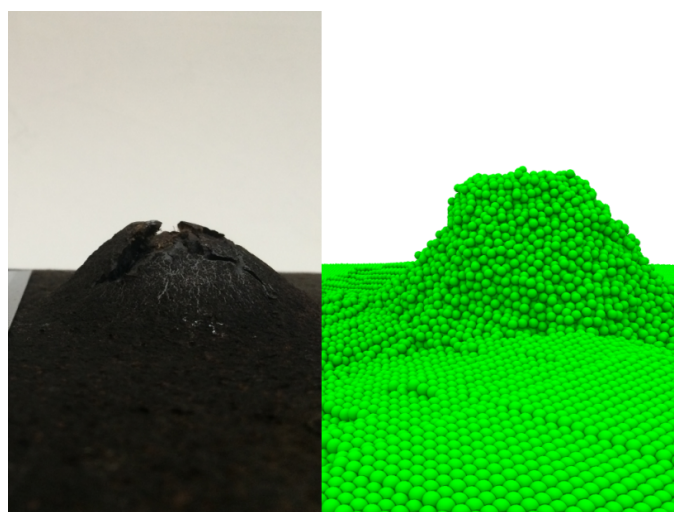


Рис. 7. Пробитие ударником преграды толщиной 45 мм (вид нижней части преграды сбоку)

## Выводы

Таким образом, сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных показал достаточно высокую точность дискретно-элементного моделирования для широкого диапазона толщин преград рассматриваемого класса: для тонких преград, пробиваемых с сохранением целостности деформируемого ударника, для преград средней толщины, пробиваемых с практически полной фрагментацией ударника на выходе из преграды, а также для непробиваемых насквозь преград.

## Список литературы (References)

- Абгарян К. К., Журавлев А. А., Загордан Н. Л., Ревизников Д. Л. Дискретно-элементное моделирование внедрения шара в массивную преграду // Компьютерные исследования и моделирование. — 2015. — Т. 7, № 1. — С. 71–79.
- Abgaryan K. K., Zhuravlev A. A., Zagordan N. L., Reviznikov D. L. Diskretno-elementnoe modelirovanie vnedreniya shara v massivnuyu pregradu [Discrete-element simulation of a spherical projectile penetration into a massive obstacle] // Computer Research and Modeling. — 2015. — Vol. 7, No. 1. — P. 71–79 (in Russian).

- Блажевич Ю. В., Иванов В. Д., Петров И. Б., Петвиашвили И. В. Моделирование высокоскоростного соударения методом гладких частиц // Математическое моделирование. — 1999. — Т. 11, № 1. — С. 88–100.  
*Blazhevich Yu. V., Ivanov V. D., Petrov I. B., Petviashvili I. V.* Modelirovanie visokoskorostnogo soudareniya metodom gladikih chastic [High impact modeling with smooth particle hydrodynamics] // Matematicheskoe modelirovanie. — 1999. — Vol. 11, No. 1. — P. 88–100 (in Russian).
- Годунов С. К., Киселев С. П., Куликов И. М., Мали В. И. Моделирование ударно-волновых процессов в упругопластических материалах на различных (атомный, мезо и термодинамический) структурных уровнях. — М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. — 296 с.  
*Godunov S. K., Kiselev S. P., Kulikov I. M., Mali V. I.* Modelirovanie udarno-volnovykh processov v uprugoplasticheskikh materialah na razlichnykh (atomniy, mezo i trmodinamicheskiiy) strukturnih urovnyah [Shockwave modeling in elastoplastic materials]. — Moscow–Izhevsk: Institut komp'yuternih issledovaniy, 2014 (in Russian).
- Златин Н. А., Красильщиков А. П., Мишин Г. И., Попов Н. Н. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. — М.: Наука, 1974. — 344 с.  
*Zlatin N. A., Krasilshchikov A. P., Mishin G. I., Popov N. N.* Ballisticheskie ustanovki i ih primeneniye v eksperimental'nykh issledovaniyakh [Ballistic stands and their applications to experimental research]. — Moscow: Nauka, 1974 (in Russian).
- Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортвов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. — М.: Янус-К, 1996. — 408 с.  
*Kanel' G. I., Razorenov S. V., Utkin A. V., Fortov V. E.* Udarno-volnovye yavleniya v kondensirovannykh sredakh [Shockwaves in condensed matter]. — Moscow: Yanus-K, 1996 (in Russian).
- Кривцов А. М. Деформирование и разрушение твердых тел с микроструктурой. — М.: Физматлит, 2007. — 304 с.  
*Krivtsov A. M.* Deformirovanie i razrusheniye tvyordih tel s mikrostrukturoy [Deformation and fracture of solid bodies with microstructure]. — Moscow: Fizmatlit, 2007 (in Russian).
- Михатулин Д. С., Полежаев Ю. В., Ревизников Д. Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. — М.: Янус-К, 2007. — 392 с.  
*Mihatulin D. S., Polezhaev Yu. V., Reviznikov D. L.* Teploobmen i razrusheniye tel v sverkhzvukovom geterogennom potoke [Heat transfer and fracture of bodies in supersonic heterogeneous flow]. — Moscow: Yanus-K, 2007 (in Russian).
- Орленко Л. П. Физика взрыва и удара. — М.: Физматлит, 2006. — 304 с.  
*Orlenko L. P.* Fizika vzriva i udara [Physics of explosion and impact]. — Moscow: Fizmatlit, 2006 (in Russian).
- Острик А. В. Метод конечно-размерных частиц в ячейке применяемый для численного моделирования высокоскоростного взаимодействия гетерогенных тел // Химическая физика. — 2008. — Т. 27, № 8. — С. 81–88.  
*Ostrik A. V.* Metod konechno-razmernih chastic v yacheyke primenyaemiy dlya chislennogo modelirovaniya visokoskorostnogo vzaimodeystviya geterogennykh tel [The finite-size particle-in-cell method for numerical simulation of highspeed interaction of heterogeneous bodies] // Himicheskaya fizika. — 2008. — Vol. 27, No. 8. — P. 81–88 (in Russian).
- Ревизников Д. Л., Семенов С. А. Особенности молекулярно-динамического моделирования наносистем на графических процессорах // Программная инженерия. — 2013. — № 2. — С. 31–35.  
*Reviznikov D. L., Semyonov S. A.* Osobennosti molekulyarno-dinamicheskogo modelirovaniya nanosistem na graficheskikh processorah [Peculiarities of molecular dynamic modeling of nanostructures on graphical processors] // Programmnaya inzheneriya. — 2013. — No. 2. — P. 31–35 (in Russian).
- Фомин В. М., Гудилов А. И., Сапожников Г. А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. — 600 с.  
*Fomin V. M., Gudilov A. I., Sapozhnikov G. A. et al.* Visokoskorostnoye vzaimodeystvie tel [Highspeed interaction of bodies]. — Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 1999 (in Russian).
- Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. High-Speed Penetration Dynamics. Engineering Models and Methods. — World Scientific, 2013, Technology & Engineering. — 696 p.