

**Барсуков Геннадий Валерьевич**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
Россия, Орел  
Заведующий кафедрой  
Доктор технических наук, доцент  
E-Mail: awj@list.ru

**Михеев Александр Васильевич**

ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»  
Россия, Орел  
Научный сотрудник, докторант  
Кандидат технических наук  
E-Mail: pr\_uchastok@mail.ru

**Моделирование внедрения твердой частицы  
в преграду при различных кинематических углах  
сверхзвукового контактного взаимодействия**

**Аннотация.** Одной из проблем, возникающей при моделировании сверхзвукового соударения твердой частицы с преградой это значительные деформации области интегрирования. В статье модель внедрения твердой частицы в преграду получена с использованием многоцелевого конечно-элементного расчетного комплекса ANSYS LS-DYNA. Задача решалась в трехмерной постановке. По результатам моделирования получены значения объемного уноса единичной частицей материала преграды с учетом зернистости и плотности индентора, угла и скорости контактного взаимодействия, физико-механических свойств материала преграды. Полученные результаты вызывают практический интерес при гидроабразивном резании материалов.

**Ключевые слова:** сверхзвуковое взаимодействие; разрушение; проникание; индентор; гидроабразивное резание; объемный унос; частица; моделирование; преграда; сверхзвуковая скорость.

Несмотря на множество преимуществ гидроабразивной резки, высокие эксплуатационные расходы снижают эффективность этой технологии, поскольку абразивы, используемые в таких процессах, существенно повышают операционные затраты [1].

Традиционно для этой технологии используют импортный гранатовый абразивный песок. Однако в России есть аналогичные по свойствам типы абразивных материалов [2, 3], которые могут подойти для резки материалов в различных отраслях промышленности, но их подбор связан с необходимостью проведения множества экспериментальных исследований. Поэтому возникает потребность в разработке модели взаимодействия твердой частицы с материалом преграды, что позволит подобрать оптимальный тип абразива для резания сверхзвуковой гидроабразивной струей.

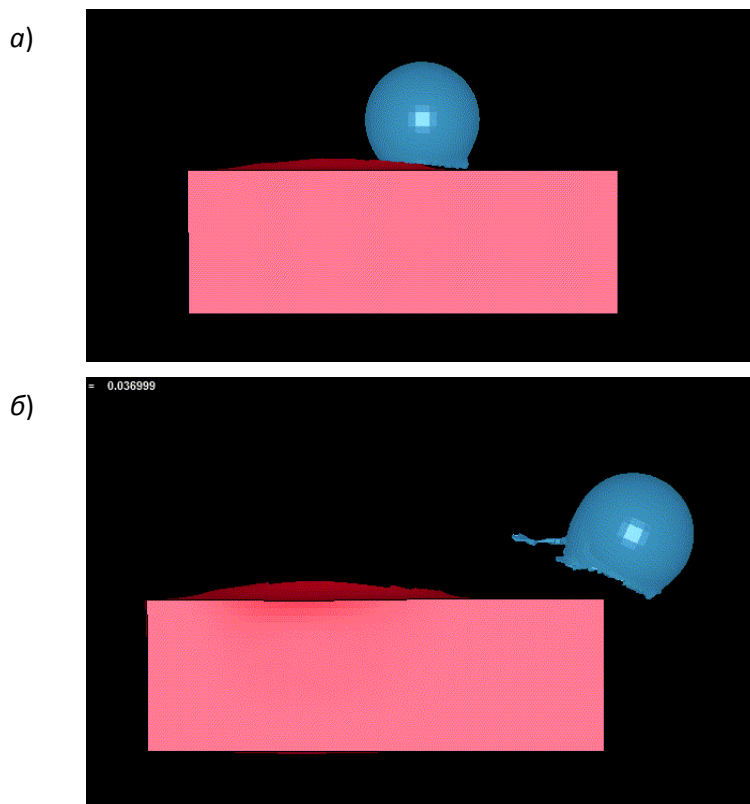
Численные решения задач сверхзвукового взаимодействия двух тел имеют ярко выраженный волновой характер, т.е. ударные процессы сопровождаются распространением волн сжатия и растяжения по области интегрирования (в данном случае - по преграде), что приводит к необходимости сквозного расчета зон с большими градиентами численного решения. В этом случае, эффективным является использование монотонных схем (или схем с положительной аппроксимацией) с минимальной аппроксимационной вязкостью. Как известно [4], этими свойствами обладает разностная схема Куранта - Изаксона - Риса, или ее обобщение - сеточно-характеристический метод, используемый в настоящей работе. В качестве перспективных (и уже используемых) схем для численного решения рассматриваемых задач следует указать метод Годунова, гибридные схемы [5].

Использование для решения задач сверхзвукового взаимодействия схем, обладающих значительной аппроксимационной вязкостью либо дисперсией представляется проблематичным, особенно при исследовании откольных явлений, либо волновых и откольных явлений в перфорированных преградах - вследствие значительного искажения возникающих в них сложных волновых процессов. Обычно в целях регуляризации решения при использовании упомянутых схем и методов вводится искусственная вязкость Неймана—Рихтмайера, либо сглаживание численного решения [6].

Одной из проблем, возникающей при численном решении задач соударения - значительные деформации области интегрирования. Традиционные пути к преодолению этой трудности - использование Лагранжевых или Эйлеровых координат (при этом в первом случае возможны искажения расчетной сетки, что приводит к необходимости их перестройки и переинтерполяции функций на новую сетку, во втором появляются сложности при постановке граничных условий и условий на контактных границах, обычно преодолеваемые с помощью «маркирования» граничных точек), методов типа «частиц в ячейках» (здесь встает вопрос об аппроксимации исходной системы уравнений динамики деформируемого твердого тела, т.е. это метод прямого численного моделирования, и показывать достоверность результатов, полученных с его помощью, можно только многочисленными сравнениями с экспериментальными и расчетными данными).

Моночисленными исследованиями установлено, что при сверхзвуковом ударе материал преграды ведет себя как пластичный, а индентор как хрупкое твердое тело [7]. Взаимодействие сопровождается откольным разрушением частицы. В этом случае при моделировании взаимодействия рассматриваемых частей может быть использован реализованный в программе LS-DYNA эффективный алгоритм Лагранжево-Эйлерового связывания.

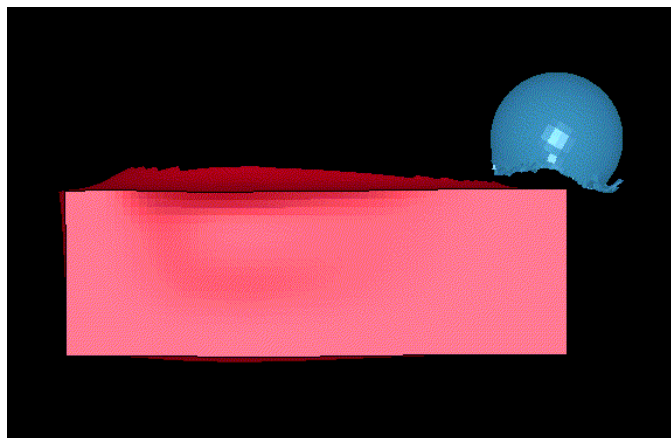
Некоторые результаты моделирования представлены на рис. 1 – 3.



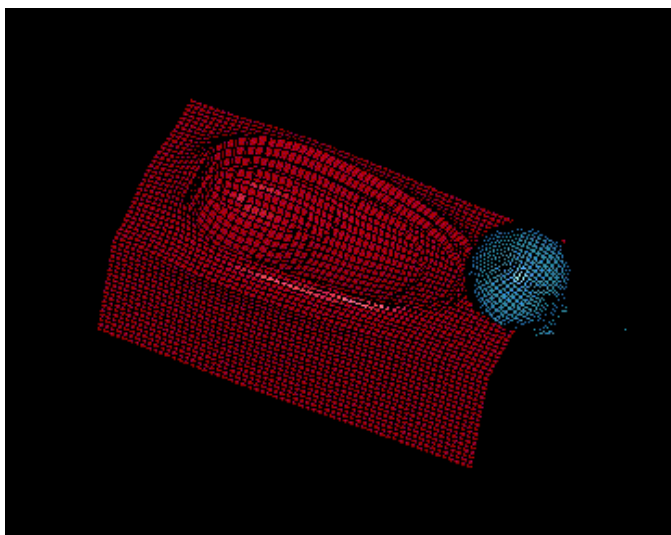
*a – 0,03 с, б – 0,06 с*

*Рис. 1. Модель объемного уноса единичной частицей материала мишени: скорость падения  $v = 800$  м/с, угол падения  $\alpha = 10^\circ$ , материал сталь 20*

а)

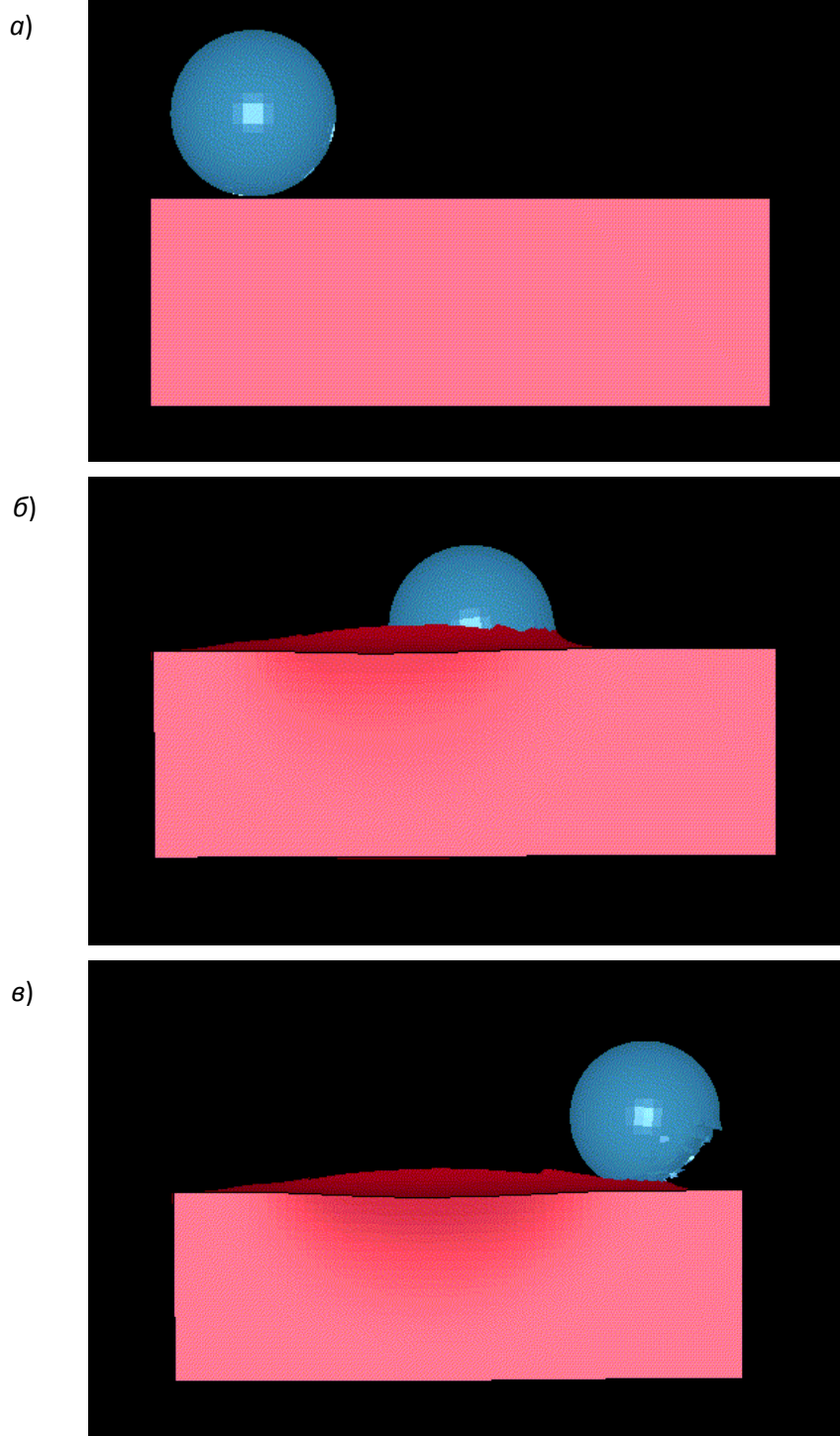


б)



а – 0,004 с, б – 0,04 с, в – 3D–модель объемного уноса

**Рис. 2.** Модель объемного уноса единичной частицей материала мишени: скорость падения  $v = 800$  м/с, угол падения  $\alpha = 20^\circ$ , материал сталь 40Х



$a - 0,004 \text{ с}$ ,  $b - 0,05 \text{ с}$ ,  $v - 0,14 \text{ с}$

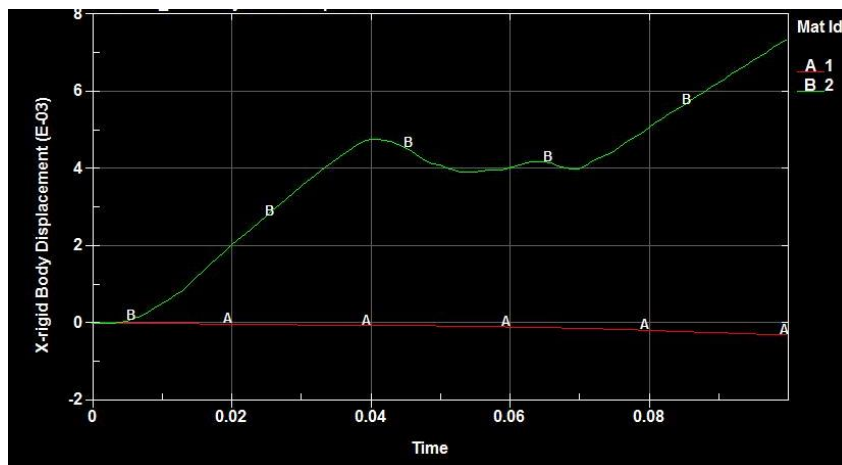
**Рис. 3.** Модель объемного уноса единичной частицей материала мишени:  
Скорость падения  $v = 300 \text{ м/с}$ , угол падения  $\alpha = 30^\circ$  материал сталь 20

В расчетах были учтены физические нелинейности, связанные с нелинейным поведением материалов частицы и преграды, и геометрическая нелинейность, вызванная большими деформациями и поворотами элементов, а также наличием контактирующих пар и разрушением материала, как преграды, так и частицы.

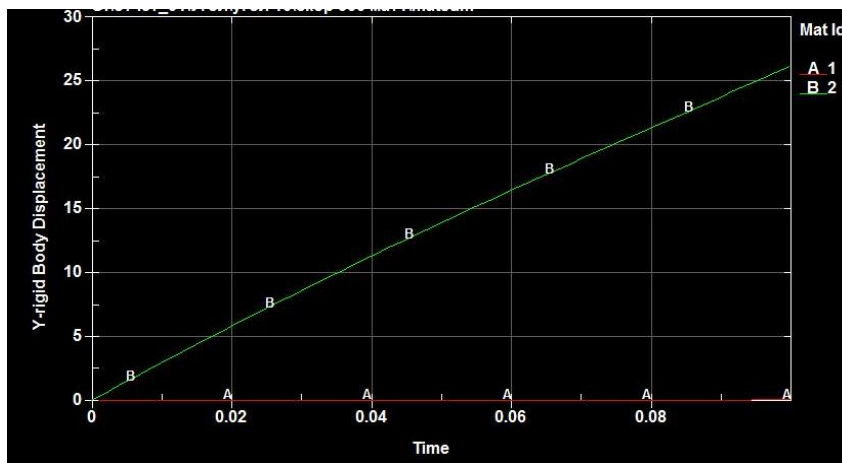
Целью моделирования являлось определение длины, ширины и глубины проникания частицы в материал в зависимости от ее зернистости и плотности, угла и скорости контактного взаимодействия, физико-механических свойств преграды (рис. 4).

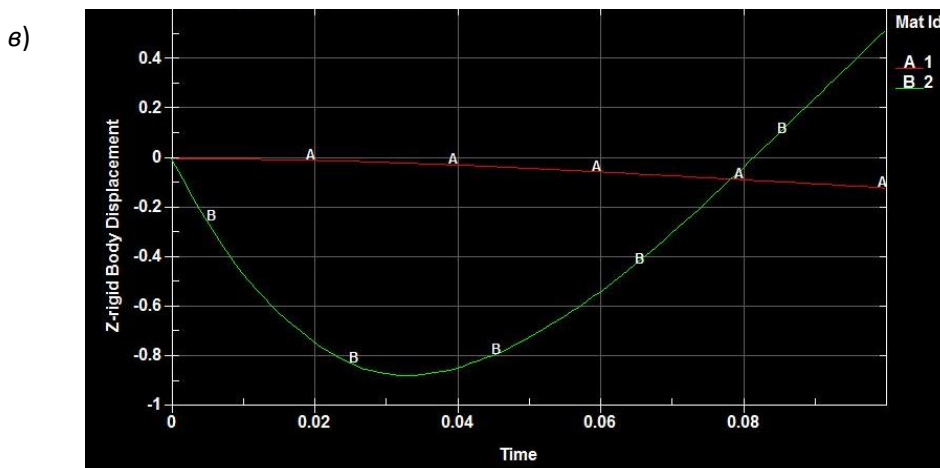
В качестве модели частицы была принята модельная среда Jonson - Holmquist (ceramic material model), а материала преграды начально-анизотропный пластичный материал (Barlat Anisotropic Plasticity). Интегрирование соответствующей системы уравнения осуществлялось явным методом с опцией автоматического выбора шага интегрирования.

а)



б)





*a* – по оси *X*, *б* – по оси *Y*, *в* – по оси *Z*

**Рис. 4.** Влияние параметров взаимодействия частицы с поверхностью мишени на геометрию риски скорость падения  $v = 300$  м/с, материал преграды сталь 20, зернистость 20, твердость 9, плотность 3,2 г/см<sup>3</sup>, материал частицы карбид кремния, угол падения  $\alpha = 10$  град

Установлено, что разрушение единичной частицы при угле контакта до 20° сопровождается откольным разрушением на крупные осколки. При углах падения близких к 90° зерно распадается на мелкие осколки.

Анализ визуального изображения процесса разрушения при численном эксперименте позволяет утверждать, что образование трещин происходит в областях максимальных значений касательных напряжений при совпадении с волнами упругой деформации.

Можно выделить три основных типа контакта и разрушения частицы:

1) при небольших углах контакта  $0 < \alpha < \frac{\pi}{9}$  и не высоких значениях вертикальной составляющей скорости, когда не происходит разрушение частицы с образованием крупных осколков, наблюдается только незначительное выкашивание материала индентора в области контакта.

2) при углах контакта  $\frac{\pi}{9} \leq \alpha < \frac{\pi}{3}$ , когда часть кинетической энергии частицы расходуется на существенное пластическое деформирование преграды, что приводит к возникновению волн упругих деформаций в инденторе высокой интенсивности, и, как следствие, индентор разрушается на крупные осколки.

3) при углах контакта  $\frac{\pi}{3} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ , когда вся кинетическая энергия частицы расходуется на пластическое деформирование преграды, индентор разрушается на мелкие осколки.

По результатам моделирования получены значения объемного уноса единичной частицей материала мишени от ее зернистости и плотности, угла и скорости контактного взаимодействия (табл. 1 – 4).

**Таблица 1**

**Величина объемного уноса единичной частицей материала мишени  
(предел текучести 250 МПа, угол падения 10 град, скорость 300 м/с)**

Тип частицы	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость, Моос	Объемный унос м <sup>3</sup> x 10 <sup>-13</sup>			
			Зернистость, мкм			
			100	120	140	160
Гранат	4	7,5	0,594	1,023	1,625	2,424
Шлак	3,6	7	0,532	0,92	1,46	2,17
Корунд	4,2	9	0,622	1,075	1,7	2,54
Наждак	3,8	8	0,56	0,971	1,54	2,3
Гематит	5	6,5	0,742	1,283	2,03	3,03
Песок	2,7	4,5	0,398	0,687	1,09	1,63

**Таблица 2**

**Величина объемного уноса единичной частицей материала мишени  
(предел текучести 500 МПа, угол падения 10 град, скорость 300 м/с)**

Тип частицы	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость, Моос	Объемный унос м <sup>3</sup> x 10 <sup>-13</sup>			
			Зернистость, мкм			
			100	120	140	160
Гранат	4	7,5	0,518	0,895	1,42	2,12
Шлак	3,6	7	0,466	0,805	1,287	1,9
Корунд	4,2	9	0,544	0,941	1,49	2,22
Наждак	3,8	8	0,492	0,85	1,35	2,1
Гематит	5	6,5	0,649	1,12	1,78	2,65
Песок	2,7	4,5	0,35	0,6	0,95	1,42

**Таблица 3**

**Величина объемного уноса единичной частицей материала мишени  
(предел текучести 800 МПа, угол падения 10 град, скорость 300 м/с)**

Тип частицы	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость, Моос	Объемный унос м <sup>3</sup> x 10 <sup>-13</sup>			
			Зернистость, мкм			
			100	120	140	160
Гранат	4	7,5	0,45	0,79	1,23	1,84
Шлак	3,6	7	0,405	0,7	1,11	1,65
Корунд	4,2	9	0,473	0,818	1,3	1,94
Наждак	3,8	8	0,428	0,739	1,17	1,75
Гематит	5	6,5	0,564	0,976	1,54	2,3
Песок	2,7	4,5	0,303	0,523	0,381	1,24



**Таблица 4**

**Величина объемного уноса единичной частицей материала мишени  
(карбид вольфрама) угол падения 5 град, скорость 500 м/с)**

Тип частицы	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость, Моос	Объемный унос м <sup>3</sup> x 10 <sup>-13</sup>			
			Зернистость, мкм			
			100	120	140	160
Гранат	4	7,5	2,11	3,65	5,8	8,66
Шлак	3,6	7	1,9	3,29	5,22	7,8
Корунд	4,2	9	2,22	3,83	6,09	9,15
Наждак	3,8	8	2,01	3,47	5,51	8,23
Гематит	5	6,5	2,64	4,57	7,25	10,8
Песок	2,7	4,5	1,42	2,46	3,91	5,85

Приведено сравнение результатов численного моделирования с теоретическими расчетами [8, 9]. Установлено, что расхождение между расчетной скоростью взаимодействия и по численной модели составляет не более 5 %, по ускорению – 5–8 %, по силе взаимодействия – 5 %, что является удовлетворительным результатом. Отмечается, что полученные ранее теоретические зависимости справедливы для углов контакта до 20<sup>0</sup>, что является достаточным для решения задач гидроабразивного резания [10].

Полученные результаты позволяют решить актуальную задачу технологии гидроабразивной резки, обеспечивающую снижение себестоимости обработки за счет применения абразивных частиц с оптимальной твердостью и плотностью на основе выявленной взаимосвязи параметров контактного взаимодействия и величиной объемного уноса под действием единичной частицы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов, Ю.С. Современные технологии гидро- и гидроабразивной обработки заготовок [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, Е.Г. Алюшин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 6 – С. 15- 20.
2. Барсуков, Г.В. Определение производительности гидроабразивного резания с учетом характеристик абразивного зерна [Текст] / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Справочник. Инженерный журнал. - 2008. - № 1. - С. 9 – 14.
3. Галиновский, А.Л. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки [Текст] / А.Л. Галиновский, В.А. Тарасов, В.М. Елфимов // Известия высших учебных заведений «Машиностроение». -2011.-№4.- с. 46-54.
4. Анисимов, С. А. Метод численного решения осесимметричных задач динамики многослойных тонких оболочек вращения [Текст] / С. А. Анисимов, С. В. Степаненко // Моделирование в механике: Сб. науч. тр. АН СССР. Сиб. отд-ние. Новосибирск, 1990. - Т. 4(21). - № 4. - С. 59-64.
5. Кошур, В. Д. Концептуальные и дискретные модели динамического деформирования элементов конструкций [Текст] / В. Д. Кошур, Ю. В. Немировский. - Новосибирск: Наука, 1990. – 356 с.
6. Благовещенский, А. С. Об обратной задаче теории распространения сейсмических волн [Текст] / А. С. Благовещенский // Тр. Ленингр. ун-та. - Л., 1966. - Вып. 1. - С. 68-81.
7. Белоцерковский, О. М. Метод крупных частиц в газовой динамике [Текст] / О. М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов. - М.: Наука, 1982. – 260 с.
8. Степанов, Ю.С. Численное моделирование напряженно-деформированное состояние сферического индентора при сверхзвуковом ударном взаимодействии с преградой [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.А. Александров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 2-3. – 2010. – С. 3 – 8.
9. Степанов, Ю.С. Моделирование разрушения многослойной преграды с газовым зазором под действием сверхзвукового струйного потока свободных абразивных частиц [Текст] / Ю.С. Степанов, Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - № 4-2. – 2010. – С. 65 – 70.
10. Барсуков, Г.В. Численное моделирование процессов сверхзвукового соударения твердых частиц с полубесконечной изотропной преградой [Текст] / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев, А.А. Александров // Наука и мир. – 2013. -№ 2. – С. 43 – 46.

**Gennady Barsukov**

State University-Education-Science-Production Complex  
Russia, Orel  
E-Mail: awj@list.ru

**Aleksandr Mikheev**

State University-Education-Science-Production Complex  
Russia, Orel  
E-Mail: pr\_uchastok@mail.ru

## **Modeling introduction of solid particles in the barrier at different kinematic angles supersonic contact interaction**

**Abstract.** One of the problems arising in modeling of supersonic collision of solid particles with a barrier is significant deformation of the domain of integration. In this paper, the implementation model of a solid particle in the barrier obtained using multipurpose finite element calculation complex ANSYS LS-DYNA. The problem was solved in a three-dimensional setting. Simulation results obtained volumetric particle entrainment unit of the target material with light of granularity and density indenter contact angle and speed of interaction of physical and mechanical properties of the target material. The results obtained are of practical interest for the causing water jet cutting of materials.

**Keywords:** supersonic interaction; destruction; penetration; indentation; abrasive water jet cutting; volumetric ablation; particle simulation; obstruction; supersonic speed.

## REFERENCES

1. Stepanov, Yu.S. Sovremennye tekhnologii gidro- i gidroabrazivnoy obrabotki zagotovok [Tekst] / Yu.S. Stepanov, G.V. Barsukov, E.G. Alyushin // Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii. – 2012. – № 6 – S. 15- 20.
2. Barsukov, G.V. Opredelenie proizvoditel'nosti gidroabrazivnogo rezaniya s uchetoм kharakteristik abrazivnogo zerna [Tekst] / G.V. Barsukov, A.V. Mikheev // Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. - 2008. - № 1. - S. 9 – 14.
3. Galinovskiy, A.L. Minimizatsiya tekhnologicheskoy sebestoimosti gidroabrazivnogo rezaniya s uchetoм stoimostnykh i tekhnologicheskikh parametrov protsessa obrabotki [Tekst] / A.L. Galinovskiy, V.A. Tarasov, V.M. Elfimov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy «Mashinostroenie».-2011.-№4.- s. 46-54.
4. Anisimov, S. A. Metod chislennogo resheniya osesimmetrichn'gkh zadach dinamiki mnogoslonykh tonkikh obolochek vrashcheniya [Tekst] / S. A. Anisimov, S. V. Stepanenko // Modelirovanie v mekhanike: Sb. nauch. tr. AN SSSR. Sib. otd-nie. Novosibirsk, 1990. - T. 4(21). - № 4. - S. 59-64.
5. Koshur, V. D. Kontseptual'nye i diskretnye modeli dinamicheskogo diformirovaniya elementov konstruksiy [Tekst] / V. D. Koshur, Yu. V. Nemirovskiy. - Novosibirsk: Nauka, 1990. – 356 s.
6. Blagoveshchenskiy, A. S. Ob obratnoy zadache teorii rasprostraneniya seysmicheskikh voln [Tekst] / A. S. Blagoveshchenskiy// Tr. Leningr. un-ta. - L., 1966. - Vyp. 1. - S. 68-81.
7. Belotserkovskiy, O. M. Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike [Tekst] / O. M. Belotserkovskiy, Yu. M. Davydov. - M.: Nauka, 1982. – 260 s.
8. Stepanov, Yu.S. Chislennoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie sfericheskogo indentora pri sverkhzvukovom udarnom vzaimodeystvii s pregradoy [Tekst] / Yu.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.A. Aleksandrov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. - № 2-3. – 2010. – S. 3 – 8.
9. Stepanov, Yu.S. Modelirovanie razrusheniya mnogoslonyy pregrady s gazovym zazorom pod deystviem sverkhzvukovogo struynogo potoka svobodnykh abrazivnykh chastits [Tekst] / Yu.S. Stepanov, G.V. Barsukov, A.V. Mikheev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. - № 4-2. – 2010. – S. 65 – 70.
10. Barsukov, G.V. Chislennoe modelirovanie protsessov sverkhzvukovogo soudareniya tverdykh chastits s polubeskonechnoy izotropnoy pregradoy [Tekst] / G.V. Barsukov, A.V. Mikheev, A.A. Aleksandrov // Nauka i mir. – 2013. -№ 2. – S. 43 – 46.