

Impact Factor:	ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
	ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
	GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
	JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)
International Scientific Journal
Theoretical & Applied Science
p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)
Year: 2025 Issue: 09 Volume: 149
Received: 06.09.2025
Accepted/Published: 30.09.2025 <https://T-Science.org>



Israil Mirzaevich Karimov
Institute of Chemistry and Technology
Associate Professor,
Tashkent, Uzbekistan
israil.karimov@mail.ru

HIGH-VELOCITY IMPACT OF A SPHERICAL SHELL ONTO A SOIL TARGET USING AN EULERIAN FORMULATION

Abstract: This paper presents the results of a three-dimensional (3D) numerical simulation of the high-velocity impact of a thin-walled steel sphere onto the surface of a deformable soil. The problem is solved using the finite element method (FEM) within an Eulerian formulation, which allows for the accurate modeling of large deformations and the crater formation process without finite element mesh degradation. The soil is modeled with an elastoplastic material model incorporating the Mohr-Coulomb strength criterion. A detailed analysis of the dynamics of the system's stress-strain state is conducted, including the distribution of von Mises stress, maximum principal stresses, and zones of accumulated plastic strain. The results demonstrate the complex interaction mechanism between the impactor and the target, which involves stress wave propagation, plastic flow of the soil, and cratering. The high effectiveness of the Eulerian approach for solving this class of problems is shown.

Key words: high-velocity impact, penetration, Eulerian formulation, finite element method, FEM, soil, Mohr-Coulomb criterion, stress-strain state, plastic strain.

Language: Russian

Citation: Karimov, I.M. (2025). High-velocity impact of a spherical shell onto a soil target using an Eulerian formulation. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 09 (149), 9-15.

Soi: <https://s-o-i.org/1.1/TAS-09-149-2> **Doi:** <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2025.09.149.2>

Scopus ASCC: 2600.

ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ УДАР СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ О ГРУНТ В ЭЙЛЕРОВОЙ ПОСТАНОВКЕ

Аннотация: В настоящей работе представлены результаты трехмерного численного моделирования процесса высокоскоростного удара тонкостенной стальной сферы о поверхность деформируемого грунта. Задача решена методом конечных элементов в эйлеровой постановке, что позволило корректно описать большие деформации и процесс образования кратера без деградации конечно-элементной сетки. Моделирование грунта выполнено с использованием упругопластической модели с критерием прочности Кулон-Мора. Проведен детальный анализ динамики напряженно-деформированного состояния системы, включая распределение напряжений по Мизесу, максимальных главных напряжений и зон накопленной пластической деформации. Результаты демонстрируют сложный механизм взаимодействия ударника с преградой, включающий распространение волн напряжений, пластическое течение грунта и формирование кратера. Показана высокая эффективность эйлерова подхода для решения задач данного класса.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, проникание, эйлерова постановка, метод конечных элементов, МКЭ, грунт, критерий Кулон-Мора, напряженно-деформированное состояние, пластическая деформация.

Введение
Изучение процессов высокоскоростного взаимодействия твердых тел с деформируемыми

средами, такими как грунты, имеет фундаментальное и прикладное значение в различных областях науки и техники, включая

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.191
ESJI (KZ) = 8.100
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

геотехнику, оборонную промышленность, планетологию и обеспечение безопасности при падении космических объектов [1, 2]. Экспериментальное исследование таких процессов сопряжено со значительными техническими и финансовыми трудностями [3]. В связи с этим численное моделирование становится основным инструментом для детального анализа физических механизмов, лежащих в основе ударного взаимодействия [4, 5, 6].

Ключевой проблемой при моделировании проникания является наличие экстремально больших деформаций и перемещений материала преграды. Классический лагранжев подход, в котором сетка конечных элементов связана с материалом, сталкивается с проблемой сильного искажения (дисторсии) элементов, что приводит к потере точности и преждевременному прекращению расчета. Альтернативой является эйлеров или произвольный лагранжево-эйлеров (ALE) подходы, где сетка либо неподвижна, либо движется независимо от материала. Эйлерова

постановка, в которой материал "протекает" через неподвижную в пространстве сетку, является наиболее предпочтительной для задач с образованием кратеров и интенсивным перемешиванием материала [7, 8, 9].

Целью данной работы является численное исследование динамики напряженно-деформированного состояния упругопластического грунта при высокоскоростном ударе полый сферической оболочки с использованием эйлеровой конечно-элементной модели.

Постановка задачи и методика расчета

Геометрическая модель и конечно-элементная сетка. Рассматривается задача удара стальной сферической оболочки о горизонтальную поверхность грунта. Ввиду симметрии задачи относительно двух вертикальных плоскостей, моделируется 1/4 часть системы (Рис. 1). Радиус сферы составляет 0.15 м, толщина стенки – 3 мм.

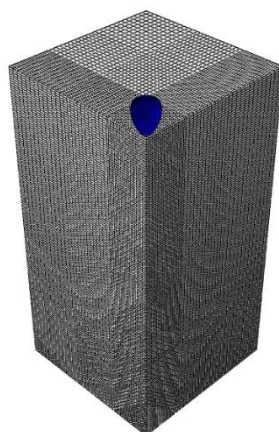


Рис. 1. Расчетная схема

Для описания грунта используется эйлерова область в виде параллелепипеда с размерами 1,5 м×3,4 м×1,5 м. Данные размеры были выбраны достаточными для минимизации влияния отраженных от границ волн напряжений на зону интереса в течение всего времени расчета.

Сферическая оболочка моделируется как лагранжево тело. Общее количество узлов в модели составляет 362 077, общее количество элементов – 344 466. Из них 344 250 гексаэдрических элементов с линейной аппроксимацией использованы для дискретизации эйлеровой области (грунта).

Модели материалов

Для моделирования материалов грунт рассматривается как изотропное упругопластическое тело [10, 11, 12]. Его упругое

поведение описывается законом Гука с модулем Юнга 40 МПа, коэффициентом Пуассона 0.3 и плотностью 1900 кг/м³. Пластическое течение и разрушение грунта определяются критерием прочности Кулон-Мора, подходящим для сыпучих сред, со следующими параметрами: угол внутреннего трения 38°, угол дилатансии 8° и сцепление 1000 Па. Материал оболочки (сферы) – сталь, которая моделируется как линейно-упругое тело. Для стали используются стандартные свойства: модуль Юнга 210 ГПа, коэффициент Пуассона 0.3 и плотность 7850 кг/м³. В качестве начальных условий сфере задается скорость 150 м/с, направленная вертикально вниз по оси Y. На плоскостях симметрии эйлеровой области (X=0 и Z=0) установлены симметричные граничные условия. На нижнюю и боковые грани эйлеровой области заданы соответствующие

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
 ISI (Dubai, UAE) = 1.582
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИНЦ (Russia) = 0.191
 ESJI (KZ) = 8.100
 SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

нулевые скорости. Взаимодействие между лагранжевой сферой и эйлеровым грунтом моделируется с помощью алгоритма "Общего контакта", который автоматически отслеживает контактные поверхности.

Результаты и их обсуждение

Анализ напряжений по Мизесу. На представленной серии изображений (рис. 2) показана динамика распределения напряжений в массиве грунта при высокоскоростном ударе стальной сферической оболочки. Визуализируемый параметр представляет собой эквивалентное напряжение по Мизесу, которое является ключевым индикатором интенсивности напряженного состояния материала. Высокие значения этого параметра (оттенки от желтого до красного) соответствуют областям, где грунт испытывает интенсивное пластическое течение и разрушение согласно заложенному в модель критерию прочности Кулона-Мора. В начальный момент времени, 0,29 мс, сразу после соударения, мы видим возникновение локальной концентрации напряжений непосредственно под точкой контакта оболочки с грунтом. Эта небольшая, но очень интенсивная красная зона - очаг зарождения пластической деформации, в то время как основной массив грунта еще не вовлечен в процесс и находится в состоянии покоя (синий цвет, низкие напряжения). По мере углубления оболочки в грунт, к моменту 0,88 мс, эта зона высоких напряжений значительно расширяется и углубляется, начиная формировать конусообразный очаг под ударником. Это свидетельствует о том, что процесс разрушения

грунта активно развивается, и кинетическая энергия снаряда интенсивно преобразуется в работу по деформации среды. К 1,75 мс, когда оболочка уже значительно погрузилась и сама начала заметно деформироваться (сплющиваться), наблюдается формирование обширной "луковичной" зоны максимальных напряжений, которая следует за проникающим телом. Эта область высоких напряжений Мизеса как раз и соответствует зоне необратимых деформаций и разрушения грунта. Наконец, к 2,92 мс, когда скорость оболочки близка к нулю и она достигла максимальной глубины, поле напряжений достигает своего максимального развития. "Луковица" напряжений полностью сформирована и имеет наибольший объем. В этот момент большая часть начальной энергии удара уже диссипировала в грунте. Особенно примечательно, что на этом этапе на поверхности грунта, на удалении от кратера, становятся видны расходящиеся концентрические волны более низкого напряжения (голубоватые кольца). Это упругие волны, распространяющиеся от эпицентра удара и показывающие, как возмущение передается по всему моделируемому объему грунта. Таким образом, за рассматриваемый интервал времени от 0,29 до 2,92 мс мы наблюдаем полный цикл передачи энергии: от начального локального контакта до формирования обширной зоны пластического разрушения под ударником и распространения упругих волн в массиве, что наглядно отражается в эволюции поля эквивалентных напряжений по Мизесу.

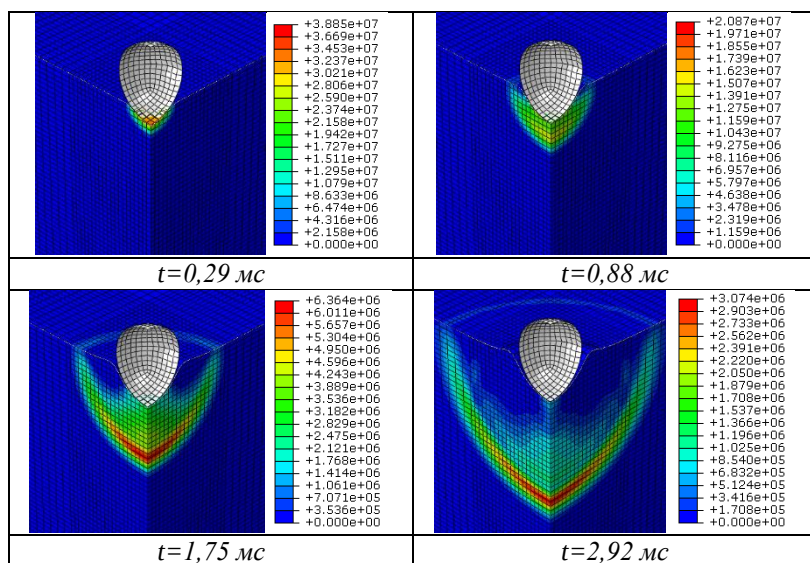


Рис. 2. Эквивалентное напряжение по Мизесу

Анализ максимальных главных напряжений.
 Представленные изображения (рис. 3)

демонстрируют эволюцию поля максимальных главных напряжений в грунте в процессе

Impact Factor:	ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
	ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	РИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
	GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
	JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

высокоскоростного удара. В данной визуализации синие оттенки соответствуют зонам интенсивного сжатия, в то время как красные - областям растяжения или очень низких напряжений, что позволяет детально понять механику разрушения материала. В самый начальный момент удара (0,29 мс), под точкой контакта возникает чрезвычайно локализованный очаг высокого сжимающего напряжения, достигающего почти 14 МПа. Это концентрированное усилие запускает процесс разрушения грунта. По мере проникания сферы (0,88 мс), эта зона трансформируется в обширную "луковицу давлений" под формирующимся кратером. Энергия удара распределяется по растущему объему, что приводит к некоторому снижению пиковых значений сжимающих напряжений, но при этом вовлекает в процесс деформации значительно большую массу грунта. Ключевое изменение в механике процесса наблюдается к 1,75 мс. В этот момент, помимо углубления зоны сжатия, на поверхности грунта вокруг формирующегося кратера появляется отчетливое кольцо красного цвета, свидетельствующее о возникновении растягивающих напряжений. Это происходит из-за того, что вытесняемый из-под ударника грунт приподнимается и изгибается, формируя кольцевой вал вокруг кратера. Для материалов типа грунта, которые плохо сопротивляются растяжению, появление этой зоны является критически важным, так как именно здесь будет происходить образование радиальных трещин и отрывное разрушение. К моменту 2,92 мс, когда проникание практически завершилось, картина напряжений достигает своего полного развития. Мы видим глубокую и широкую "луковицу" сжатия под полностью сформированным кратером и ярко выраженную, обширную кольцевую зону растягивающих напряжений на поверхности. Таким образом, анализ главных напряжений предоставляет глубокое понимание сложной механики разрушения, наглядно разделяя механизмы смятия и сдвига от сжатия в глубине массива и механизм отрывного разрушения от растяжения на его поверхности.

Анализ эквивалентных пластических деформаций (PEEQ). На рис. 4 представлен анализ эквивалентных пластических деформаций,

который является ключевым показателем необратимого изменения формы и разрушения материала. В отличие от напряжений, которые могут снижаться и перераспределяться, пластическая деформация является накапливаемой величиной - она показывает картину остаточных деформаций, зафиксированную в грунте после ударной нагрузки. Здесь синий цвет означает отсутствие пластических деформаций, а оттенки от зеленого до красного показывают зоны, где грунт был необратимо деформирован. На начальном этапе (0,29 мс) видно зарождение пластической зоны - это крошечная область красного цвета непосредственно под точкой контакта. Именно здесь напряжения впервые превысили предел прочности грунта, и начался процесс необратимого смятия. Это самый первый момент формирования будущего кратера. К моменту 0,88 мс, по мере углубления сферы, зона пластических деформаций значительно выросла, сформировав под кратером четкую "луковицу". Максимальное значение PEEQ, резко возросло, что говорит об очень интенсивном процессе деформации. Эта область соответствует объему грунта, который был смят, уплотнен и подвергся интенсивным сдвигам. Далее, к 1,75 мс, эта "луковица" пластических деформаций достигает еще большей глубины и ширины. Зона максимальных деформаций (красный цвет) сконцентрирована в центре, вдоль траектории движения сферы, где происходило наиболее интенсивное разрушение. Окружающие слои (желтый и зеленый) также вовлечены в пластическое течение, но с меньшей интенсивностью. Наконец, на изображении для 2,92 мс мы видим финальную картину остаточных деформаций после того, как сфера остановилась. Область PEEQ больше не растет в объеме, так как активная фаза удара завершена. Эта картина представляет собой итоговый результат воздействия: она показывает точный размер и форму зоны необратимо разрушенного и уплотненного грунта, который останется таким навсегда. Это и есть физическое воплощение кратера и уплотненного ядра под ним, которое теперь зафиксировано в структуре материала.

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
 ISI (Dubai, UAE) = 1.582
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИИЦ (Russia) = 0.191
 ESJI (KZ) = 8.100
 SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

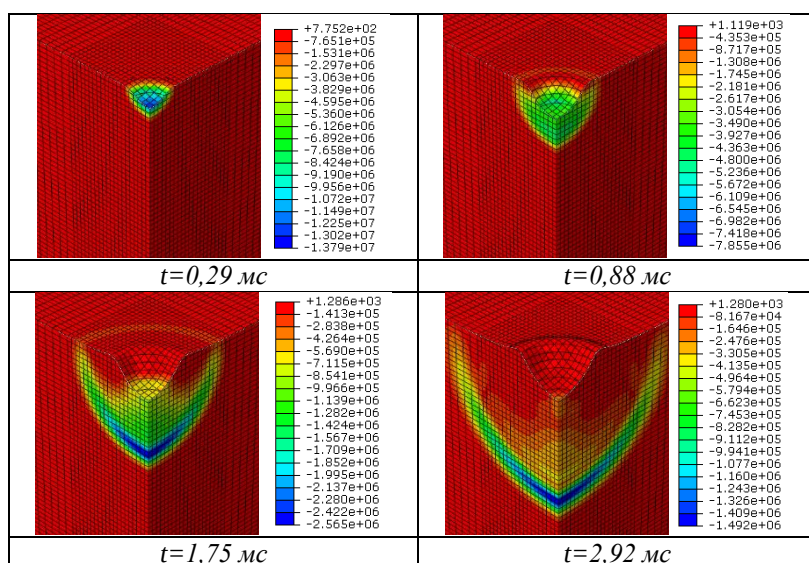


Рис. 3. Максимальные главные напряжения

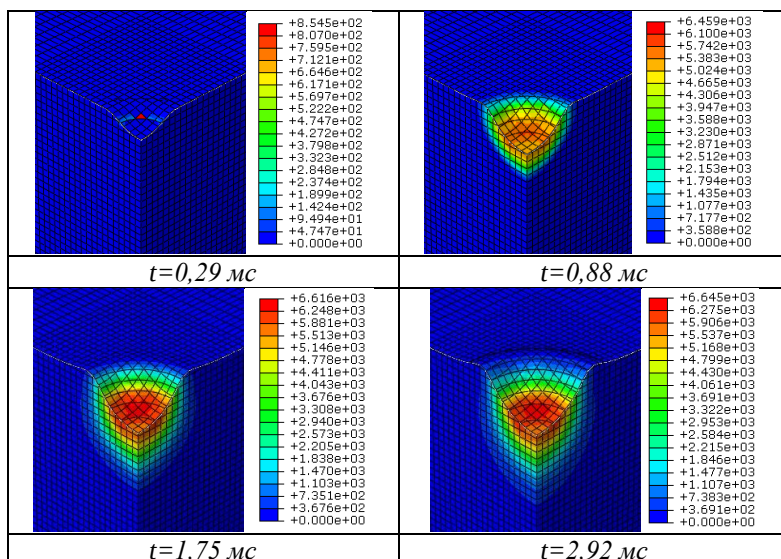


Рис. 4. Эквивалентные пластические деформации

Анализ изменения вертикальной скорости.
 На рис. 5. изображена динамика вертикального движения частиц грунта в процессе удара. Легенда (справа от основной картинке вертикальный столбец) четко показывает, что отрицательные значения (синие и голубые тона) соответствуют движению вниз, по направлению удара, а положительные (от красного до желтого) - движению вверх, против направления удара. Зеленый цвет представляет собой область практически неподвижного грунта. В начальный момент времени, 0,29 мс, картина очень локализована. Непосредственно под точкой контакта мы видим небольшой, но интенсивный очаг синего цвета, где частицы грунта приобрели высокую скорость, направленную вниз. Это прямой результат того, что сфера "толкает"

материал перед собой, создавая волну сжатия и заставляя грунт двигаться в том же направлении. Уже к 0,88 мс физическая картина кардинально меняется. Зона движения вниз (синяя) углубилась и расширилась, но на поверхности, по краям формирующегося кратера, возникла и интенсивно развивается область с положительной скоростью (желтый, оранжевый и красный цвета). Это ключевой момент, демонстрирующий механизм образования кратера: материал не просто сжимается, а начинает вытесняться и выбрасываться вверх и в стороны. Мы видим начало формирования кольцевого вала из выброшенного грунта. К моменту 1,75 мс этот процесс достигает своего наибольшего развития. Сформировался сложный поток: глубоко под кратером продолжается движение вниз, так как

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.191
ESJI (KZ) = 8.100
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

сфера все еще проникает вглубь, а по краям воронки наблюдается мощный "фонтан" материала, движущегося вверх с высокой скоростью. Этот выброс грунта, окрашенный в красные и оранжевые тона, и есть тот самый материал, который формирует приподнятую кромку кратера. Наконец, в 2,92 мс мы видим фазу затухания процесса. Хотя общая структура потока

сохраняется - вниз под центром и вверх по краям - абсолютные значения скоростей, как положительных, так и отрицательных, заметно снизились по сравнению с предыдущим шагом. Это означает, что сфера почти остановилась, передав свою энергию грунту, и интенсивность движения частиц резко падает.

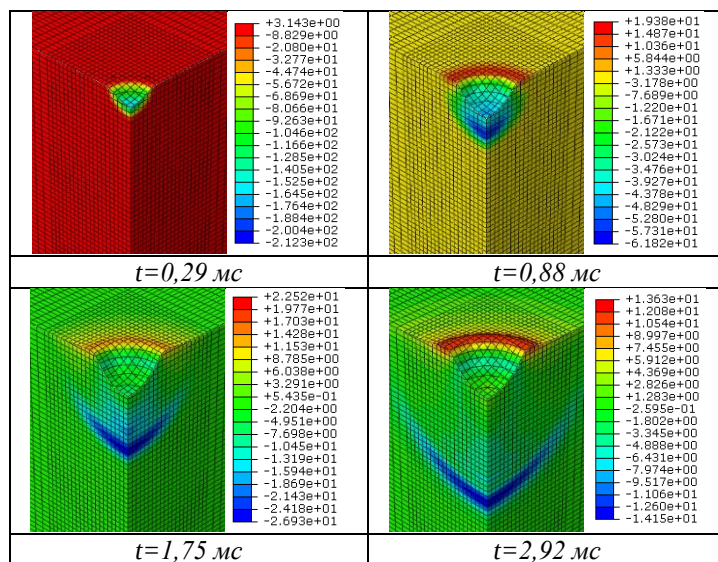


Рис. 5. Изменение вертикальной скорости грунта

Заключение

В работе проведено численное моделирование высокоскоростного удара сферической оболочки о грунт с использованием эйлеровой постановки. На основе анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Эйлеров подход продемонстрировал свою эффективность для решения задач динамики с большими деформациями, позволив детально смоделировать весь процесс от начального контакта до полного формирования кратера без численных проблем, связанных с искажением сетки.

2. Установлено, что механизм проникания носит сложный характер: он включает в себя уплотнение грунта непосредственно под

ударником и его интенсивное сдвиговое вытеснение, что приводит к пластическому течению материала.

3. Показано, что формирование вала вокруг кратера обусловлено возникновением растягивающих напряжений на свободной поверхности грунта.

4. Проведенный анализ распределения пластических деформаций позволяет количественно оценить зону необратимых повреждений грунта и конечные размеры кратера.

Полученные результаты вносят вклад в понимание физики высокоскоростного проникания и могут быть использованы для верификации инженерных моделей и проектирования защитных сооружений.

References:

1. Fomin, V.M., Gulidov, A.I., Sapojnikov, G.A., et al. (1999). *Vysokoskorostnye vzaimodeystvie tel.* (600p.). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN.
2. Aptukov, V.N., Murzakaev, A.V., & Fonarov, A.V. (1992). *Prikladnaya teoriya pronikaniya.* (105p.). Moscow: Nauka.
3. Zlatin, N.A., Mishin, G.I., et al. (1974). *Ballisticheskiye ustanovki i ix primeneniye v*

Impact Factor:	ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
	ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИИ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
	GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
	JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

- eksperimentalnix issledovaniyax* (344p). Moscow: Nauka.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th Edition. Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN: 978-1856176330.
 - Bathe, K. J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall. ISBN: 978-0133014587.
 - Zukas, J.A., Nicholas, T., Swift, H.F., Greszczuk, L.B., & Curran, D.R. (1982). *Impact Dynamics*. Wiley. ISBN: 978-0471093856.
 - (n.d.). *Coupled Eulerian Lagrangian Full Guide + Abaqus Simiulation Tips*. Retrieved from <https://caeassistant.com/blog/coupled-eulerian-lagrangian-abaqus/>
 - Qiu, G., et al. (2011). "Application of a Coupled Eulerian-Lagrangian approach to geotechnical problems involving large deformation." *Computers & Structures*. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.09.002>
 - Evans, W., et al. (2016). "An Eulerian approach to soil impact analysis for homeland security applications." *International Journal of Impact Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.12.011>
 - (2009). *ABAQUS Theory Manual*. Retrieved from <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/stm/default.htm>
 - (n.d.). Abaqus Soil Modeling. Retrieved from <https://caeassistant.com/blog/abaqus-soil-modeling/>.
 - (2024). *Numerical study on modeling the soil footpad interaction of lunar soft landers at touchdown (Pucker et al., 2024)*. Retrieved from <https://repos.hcu-hamburg.de/bitstream/hcu/1013/1/1-s2.0-S0266352X24002775-main.pdf>