

XVII Международной конференции «ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»
19–23 мая 2025 г., Снежинск

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В РАМКАХ ЛАГРАНЖЕВА ПОДХОДА
В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Андрей Васильевич Радченко, П. А. Радченко, С. П. Батуев, А. В. Кануткин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда научных исследований
(проект № 24-21-00421, [https://rscf.ru/ project/№ 24-21-00421/](https://rscf.ru/project/№%2024-21-00421/))



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

РОУ2019664836

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства): 2019664836 Дата регистрации: 14.11.2019 Номер и дата поступления заявки: 2019660870 07.08.2019 Дата публикации и номер бюллетеня: 14.11.2019 Бюл. № 11 Контактные реквизиты: нет	Автор(ы): Радченко Павел Андреевич (RU), Батуев Станислав Павлович (RU), Радченко Андрей Васильевич (RU) Правообладатель(и): Радченко Павел Андреевич (RU), Батуев Станислав Павлович (RU), Радченко Андрей Васильевич (RU)
---	--

Название программы для ЭВМ:
Трехмерное моделирование деформации и разрушения гетерогенных материалов и конструкций при динамических нагрузках (EFES 2.0)

Реферат:
Программный комплекс (ПК) позволяет моделировать поведение материалов и конструкций при импульсных нагрузках. Есть возможность использования всех ядер в системе, не имеет ограничений на количество конечных элементов и тел. ПК позволяет задавать различные начальные и граничные условия. При помощи ПК можно решать контактные задачи высокоскоростного взаимодействия твердых тел.

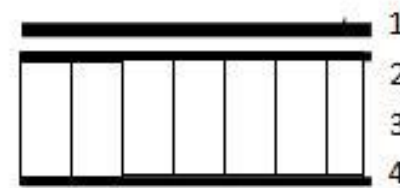
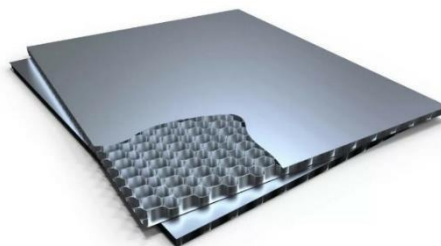
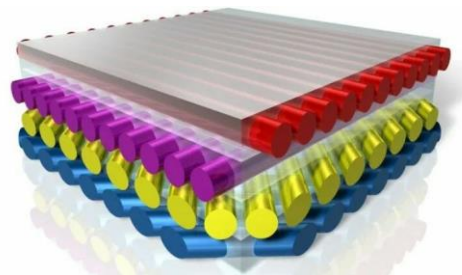
Язык программирования: Fortran

Объем программы для ЭВМ: 85 Кб

Explicit Finite Element Solver (EFES) –
явный конечно-элементный решатель.

EXAMPLES OF STRUCTURES SUBJECT TO LOW AND HIGH-VELOCITY IMPACTS

КОНСОЛЬ КРЫЛА САМОЛЕТА МС-21-300

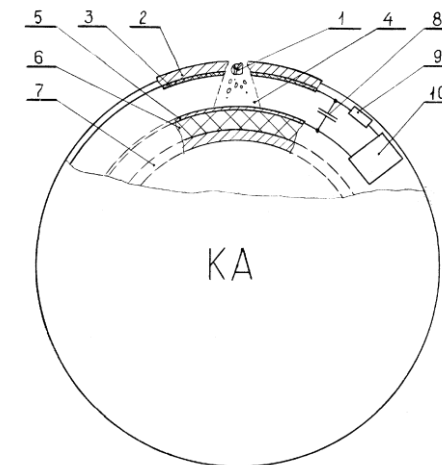


a

b

Screen made of a three-layer panel: a) - structural diagram of the panel; b) – destroyed panel (particle diameter 1.75 mm, speed 7.2 km/s, angle of incidence 45); 1 – EVTI; 2 – front from the tent; 3 – cellular; 4 – rear wall.

Зеленцов В.В. Защита космического аппарата от воздействия фрагментов мелкого космического мусора // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 06. С. 123–142. DOI:10.7463/0615.0778339.



Gurov A.E., Kasaev A.S. Method of protection of spacecraft against meteor particles and device for realization of this method // RU 2 128 609 C1, 10.04.1999



СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

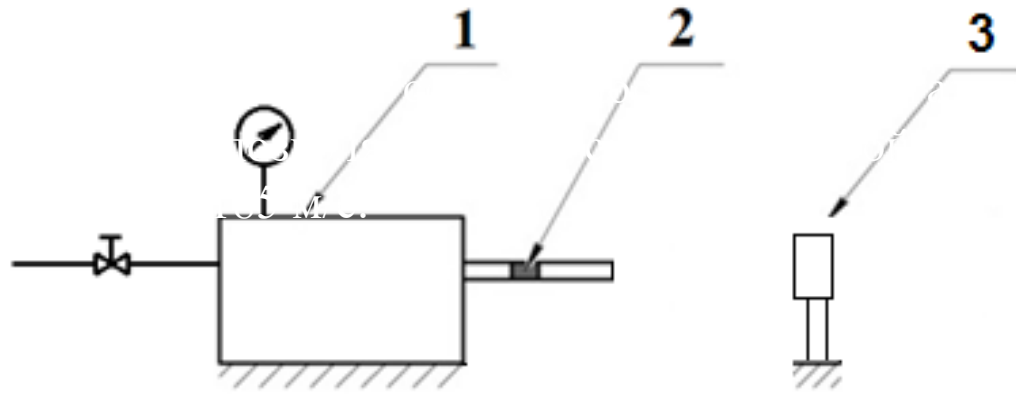
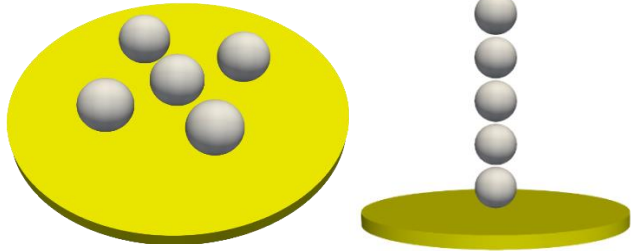


Table 1. Comparison of Experimental and Numerical Results.

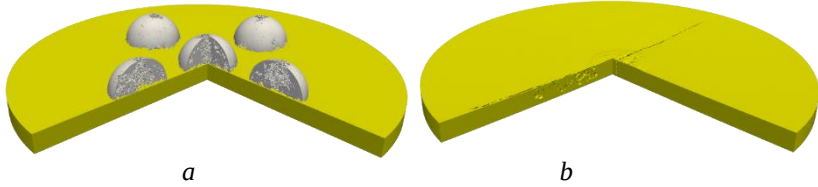
h , mm	u_0 , m/s	u_{exp} , m/s	u_{cal} , m/s	δ , %
4.2	184	100	107	7
4.1	167	77	84	9
3.6	175	93	98	5
3.2	175	120	130	8



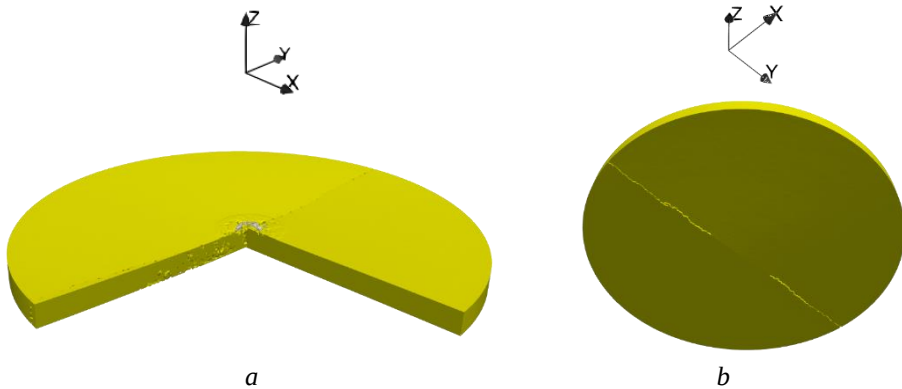
LOW-VELOCITY INTERACTION



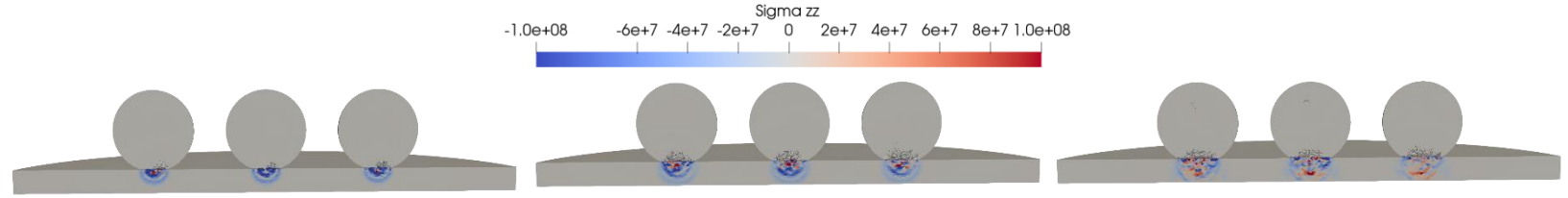
Problem Statement: simultaneous group strike (a) and sequential strike (b).



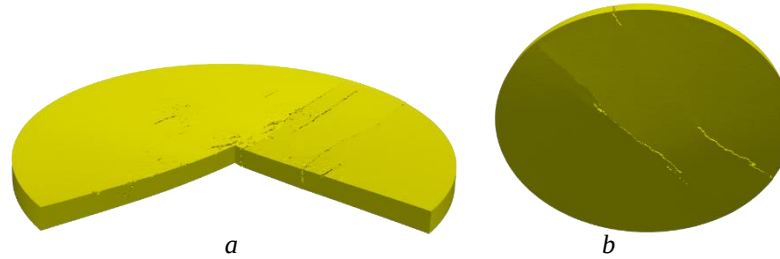
Final damage patterns for the interaction of ice particles with an initial velocity of 250 m/s for the group (a) and sequential impact (b), respectively, at $t = 30 \mu\text{s}$.



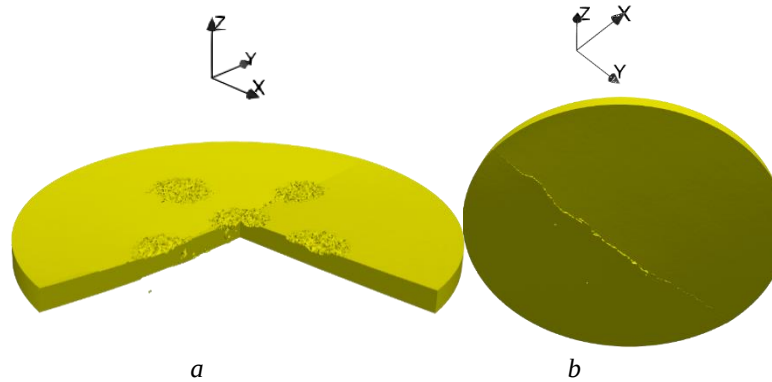
Consecutive impact with an initial velocity of 300 m/s at $t = 150 \mu\text{s}$ on the front (a) and rear surface of the plate (b), respectively.



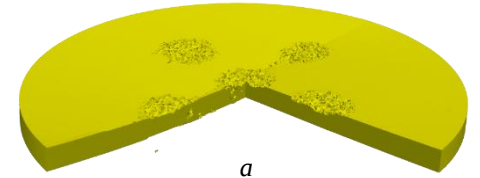
Distribution of the stress σ_{zz} isolines in the plate at the indicated moments ($t = 1.25, 2$ and $3 \mu\text{s}$) in time in the ZX cross-section. The initial velocity was 300 m/s.



Final damage pattern for the group impact with an initial velocity of 300 m/s of the front (a) and rear surface of the plate (b), respectively.

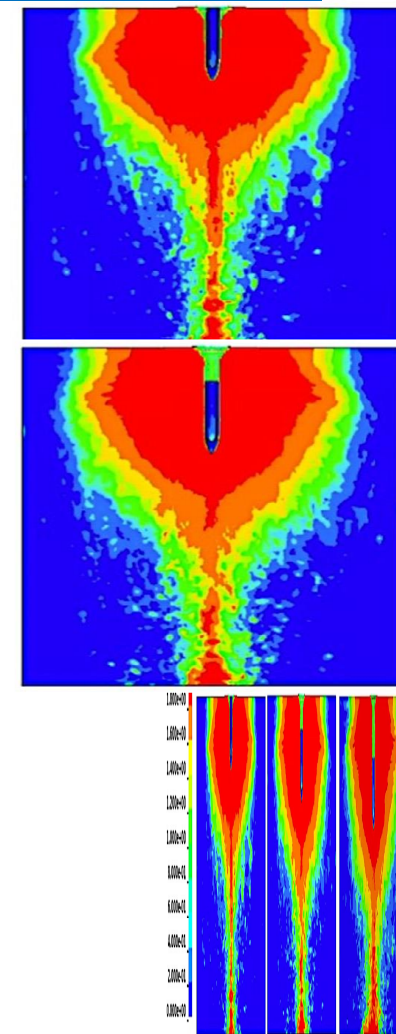
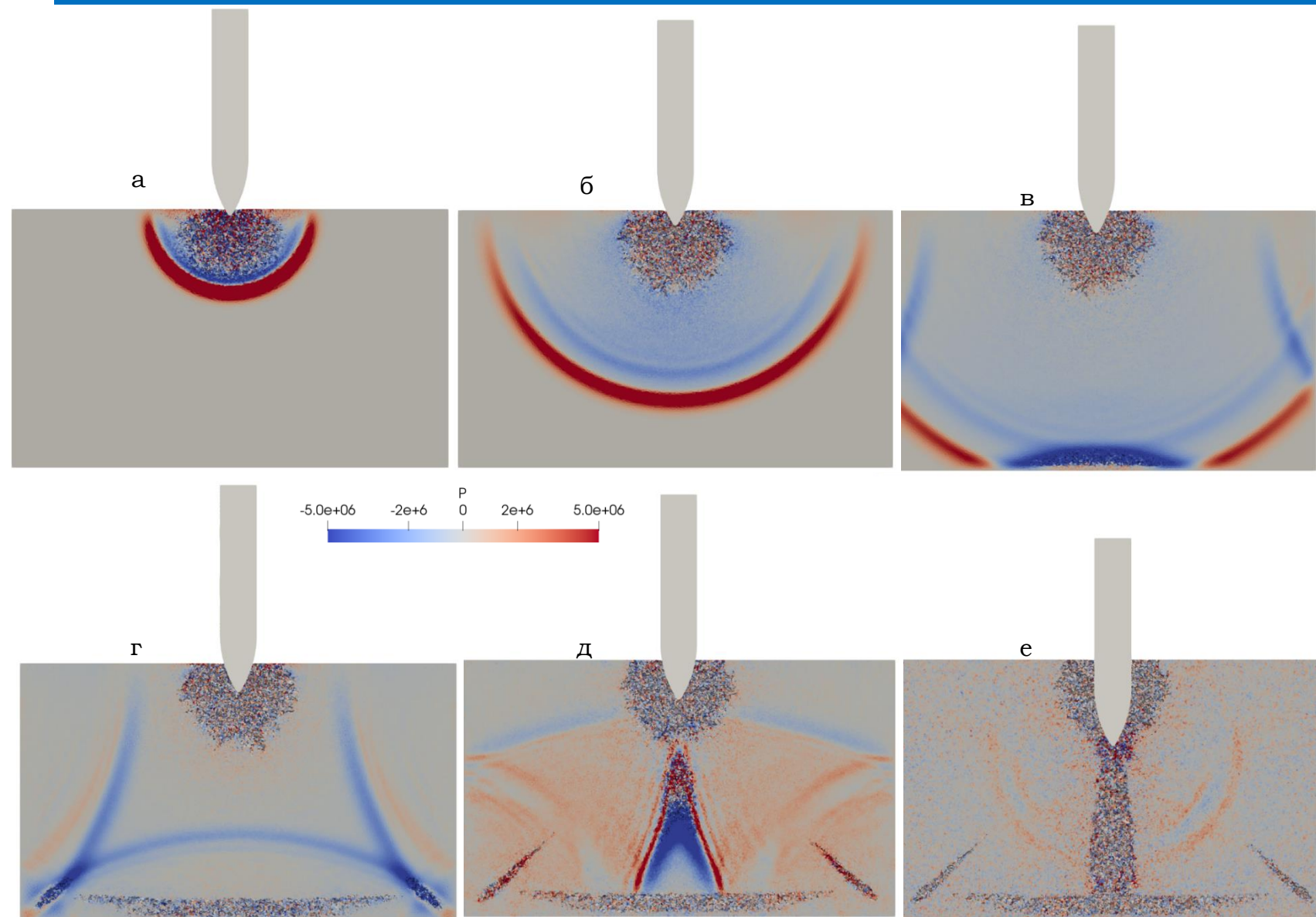


Final damage pattern for the group impact with an initial velocity of 500 m/s on the front (a) and rear surface of the plate (b), respectively.



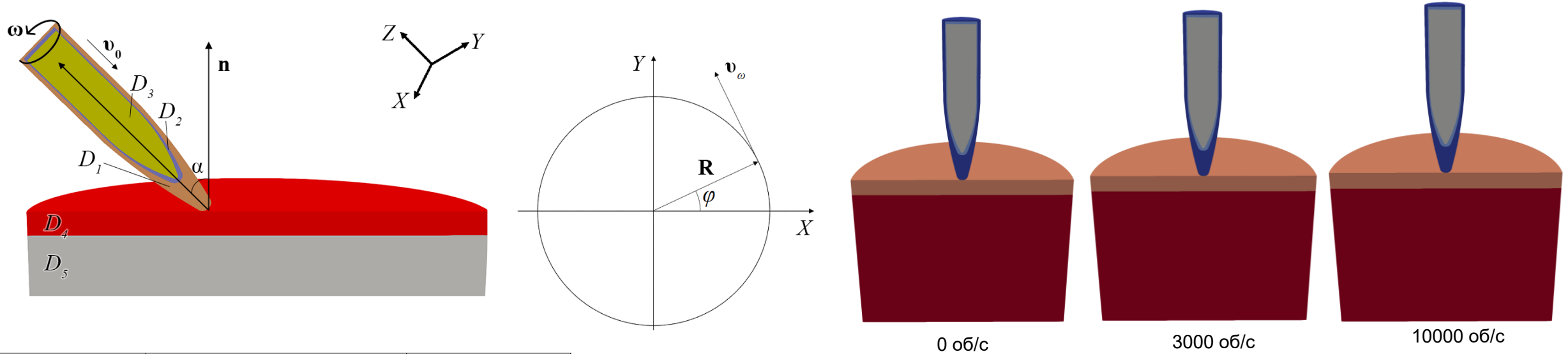
Final damage pattern for the group impact with an initial velocity of 500 m/s on the front (a) and rear surface of the plate (b), respectively.

High-velocity Interaction and Hypervelocity Interaction



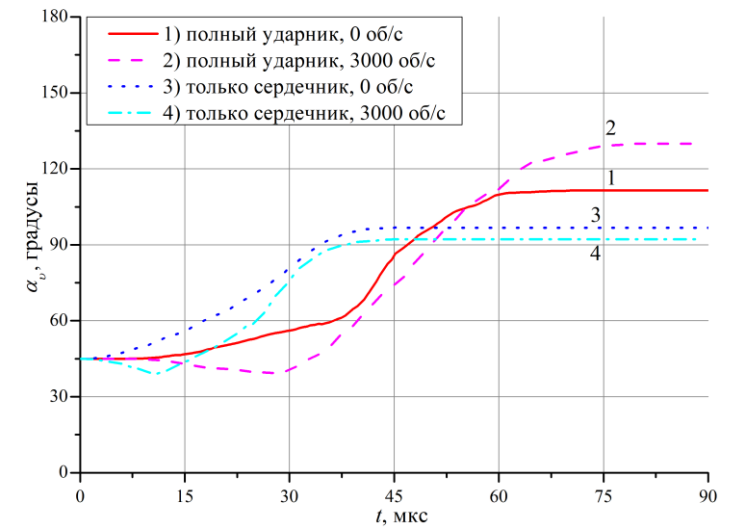
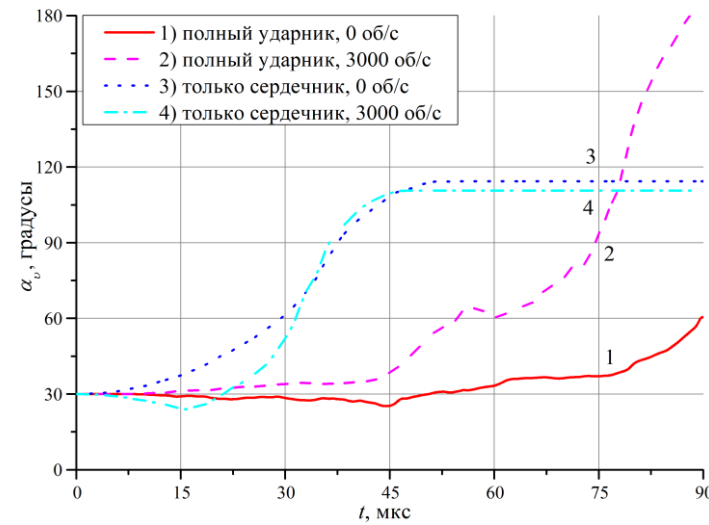
Jian Liu, Chengqing Wu, Yu Su, Jun Li, Ruizhe Shao, Gang Chen, Zhongxian Liu Experimental and numerical studies of ultra-high performance concrete targets against high-velocity projectile impacts // Engineering Structures, - 2018. - V. 173. - P. 166–179

Изолинии давления (Па) и разрушение в бетоне. а) $t=10$ мкс, б) $t=20$ мкс, в) $t=28$ мкс, г) $t=35$ мкс, д) $t=48$ мкс, е) $t=100$ мкс. $u_0=606$ м/с.

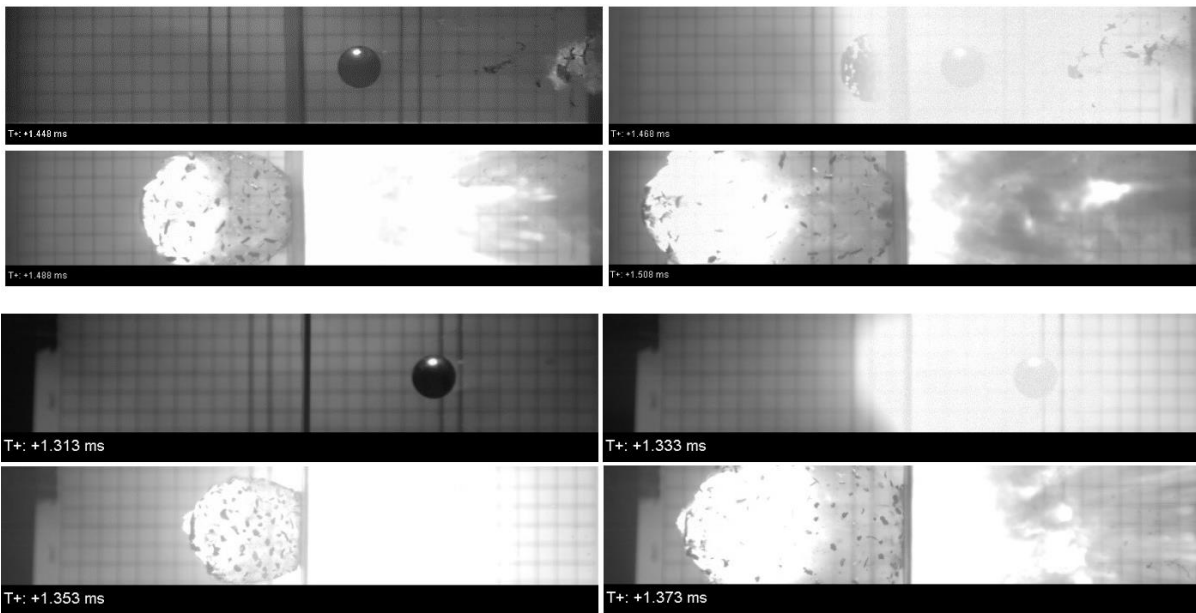
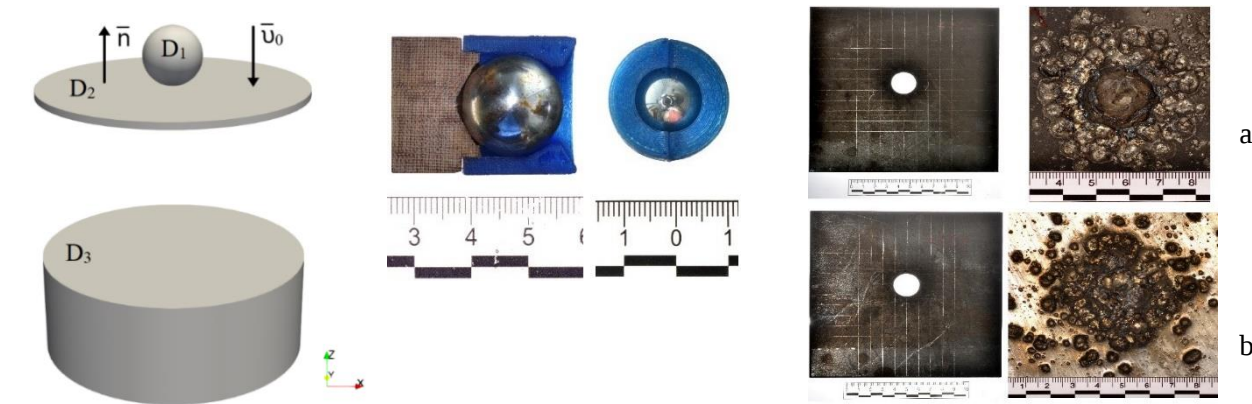


Толщина керамического слоя, мм	Глубина кратера, мм		Погрешность, %
	эксперимент	расчет	
1.25	40.6	37.8	6.9
2.5	33.4	33.2	0.6
3.75	10.1	9.3	7.9
5	0	0	0

Moynihan T.J., Chou S.-C., Mihalcin A.L. Application of the Depth-of-Penetration Test Methodology to Characterize Ceramics for Personnel Protection. Army Research Laboratory. ARL-TR-2219. 2000. 43 p.



Ударный инструмент	Частота вращения ν , об/с	Удар под углом α , град					
		0		30		45	
		глубина кратера, мм	состояние инструмента	глубина кратера, мм	состояние инструмента	глубина кратера, мм	состояние инструмента
Сердечник	0	0	отскок	0	рикошет	0	рикошет
	3000	0	отскок	0	рикошет	0	рикошет
Полный ударник	0	10.9	торможение	3	торможение	0	рикошет
	3000	9.3	торможение	0	рикошет	0	рикошет
	10000	11.5	торможение	0	рикошет	0	рикошет
Стальной монолитный ударник	0	3	отскок	0	рикошет	0	рикошет
	3000	2	отскок	0	рикошет	0	рикошет
	10000	0	отскок	0	рикошет	0	рикошет



a – 2099 m/s

b – 2312 m/s

a

b

a

b

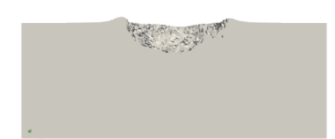
	v_r , m/c	d_{scr} , MM.	h_{wit} , MM	d_{wit} , MM.
Experiment, $v_0=1466$ m/c	1412	18.83	10.01	29.8
Calculation, $v_0=1466$ m/s	1430	20	11.1	31
δ , %	1.3	6.2	10.9	4
Experiment, $v_0=1986$ m/s	1852	20.53	12.32	22.03
Расчет, $v_0=1986$ m/s	1894	20.8	12.5	24.3
δ , %	2.1	2.4	1.5	10.3
Experiment, $v_0=2312$ m/s	2150	21.47	7.35	–
Calculation, $v_0=2312$ m/s	1950	21	7.8	–
δ , %	9.3	2.2	6.1	–
Calculation, $v_0=6000$ m/s	5826	20.2	–	–
Calculation, $v_0=7000$ m/s	6825	22	–	–



1466 m/s



1986 m/s



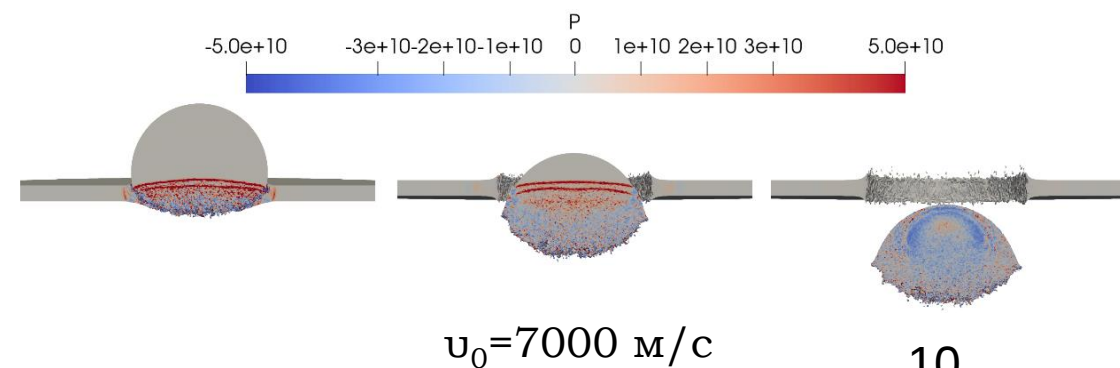
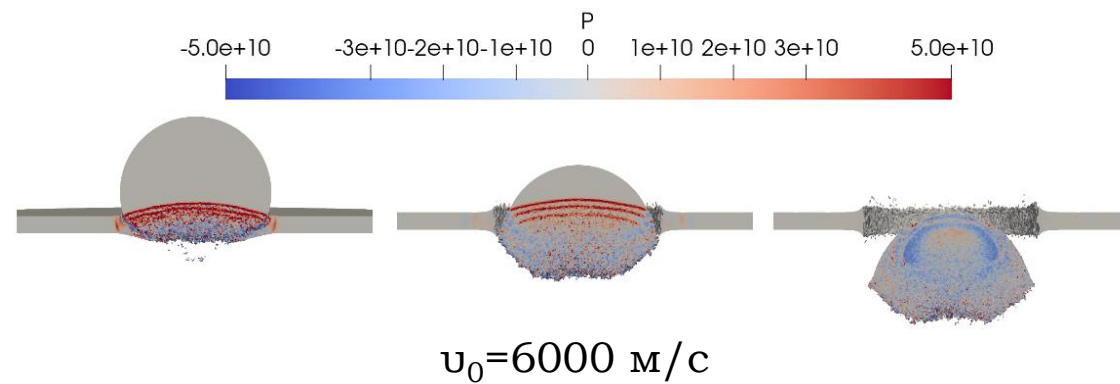
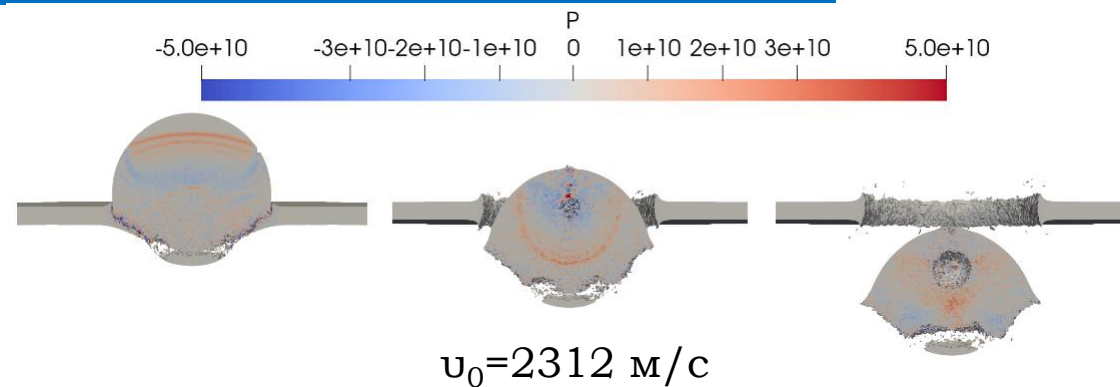
2312 m/s

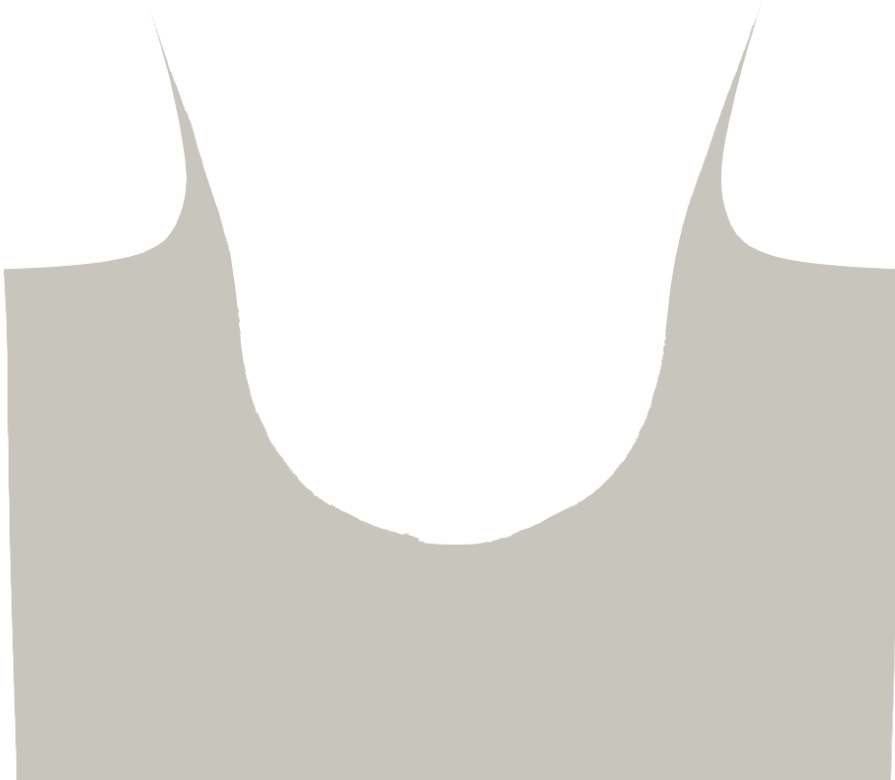


$u_0 = 1466 \text{ m/c}$



$u_0 = 1986 \text{ m/c}$





$h = 6.38 \text{ mm}$



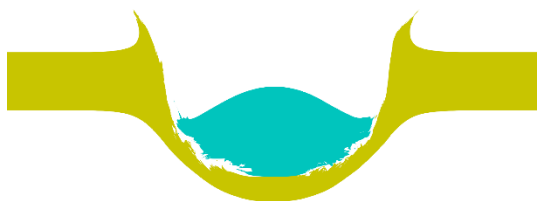
$d = 3.2 \text{ mm Al}$
Barrier 2024-T3 Al
7400 m/s

$h = 6.61 \text{ mm}$

C.J. Maiden and A.R. McMillan. An Investigation of the Protection Afforded a Spacecraft by a Thin Shield. *AIAA Journal*, 2(11): 1992–1998, 1964.

Hypervelocity Interaction

3 km/s



9 μ s

7 km/s



5 μ s

10 km/s

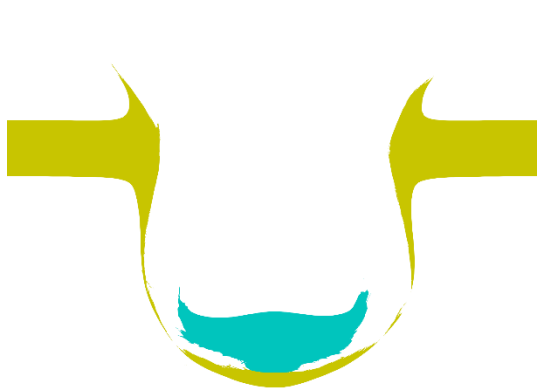


2 μ s

15 km/s



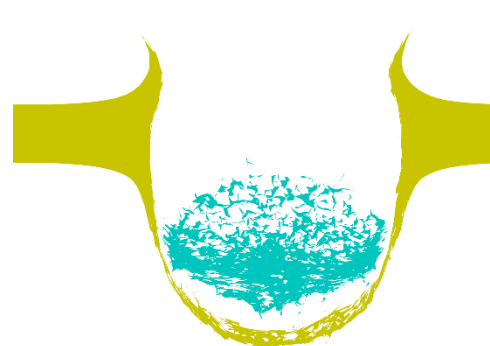
1 μ s



18 μ s



10 μ s



4 μ s



2 μ s

Спасибо за внимание!