



*Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)*

# **Моделирование баллистической стойкости арамидных тканей с поверхностной обработкой**

**Долганина Наталья Юрьевна,**  
кандидат техн. наук

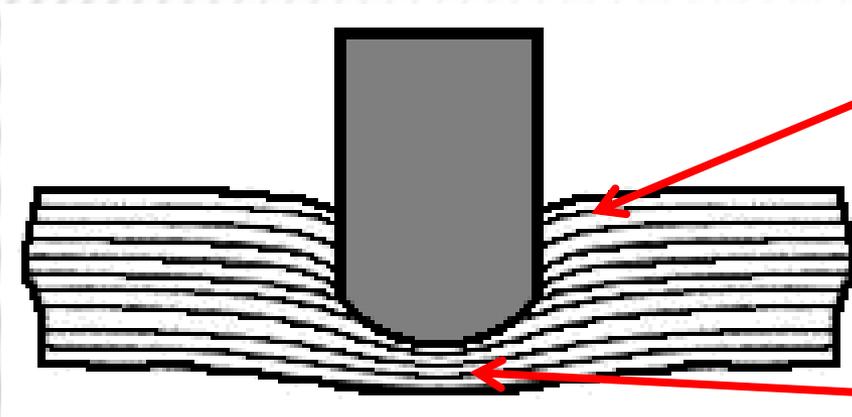
*Москва, 2018*

# ПРИМЕНЕНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ



# ТКАНЕВЫЕ БРОНЕЖИЛЕТЫ

Основная задача при проектировании бронежилетов – минимизация массы при сохранении заданного уровня защиты



Наружные слои бронежилета – динамическая фаза работы тканей (растяжение и разрыв нитей)

Тыльные слои бронежилета – фрикционная, низкоскоростная фаза работы тканей (вытягивание нитей)

В тканевой бронепанели большая часть кинетической энергии пули рассеивается за счет вытягивания нитей из тканей

Бронепанель должна поглотить (рассеять) максимум кинетической энергии пули, чтобы снизить запреградную энергию, передаваемую защищаемому объекту, т.е. снизить прогиб тыльной стороны бронепанели

# СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ПРОГИБОВ ТЫЛЬНОЙ СТОРОНЫ БРОНЕПАНЕЛИ

№	Наименование	Достоинства и недостатки
1	Комбинирование тканей разных типов переплетения (наружные слои – с минимальным искривлением нитей, тыльные – с максимальным)	Усложнение логистики и увеличение стоимости изделия
2	Сквозная прошивка пакета	Снижение гибкости и комфортности ношения
3	Покрытие тканей слоем полимера или использование неньютоновских жидкостей	Значительное увеличение массы ткани, невозможность вытягивания нитей, их обрыв при локальном ударе
4	Использование композиций с абразивными частицами	Работает лишь для случая прокола/прореза
5	<b>Поверхностная обработка тканей</b>	<b>Увеличение фрикционного взаимодействия нитей, минимальное утяжеление</b>

# ВИДЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ТКАНИ

Арамидная ткань полотняного переплетения (тип Р110),  
поверхностная плотность 110 кг/м<sup>2</sup>

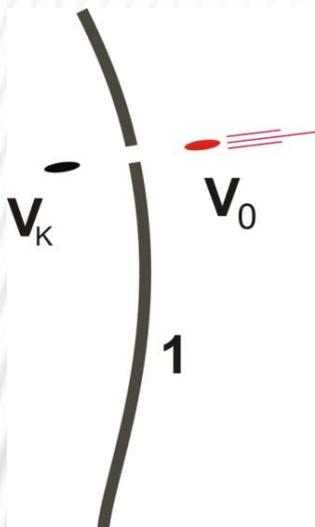
## Критерии выбора поверхностной обработки:

- Возможность управления процессом фрикционного взаимодействия между нитями (увеличение/уменьшение коэффициента трения)
- Не сильные связи между нитями, для исключения разрыва нитей при вытягивании
- Незначительное утяжеление ткани

№	Наименование	Утяжеление
1	Ткань без поверхностной обработки	–
2	Водная эмульсия ПВА	5,1%
3	ПВА-Т с температурной обработкой при +98°С	5,1%
4	Канифоль сосновая В10	3,1%

# СЕРТИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ БРОНЕЖИЛЕТОВ (NIJ STANDARD-0101.06)

## Определение баллистического предела $V_{50}$



## Определение глубины вмятины в регистрирующей среде



1 - бронежилет; 2 - регистрирующая среда (Roma Plastilina);

$W$  - фактический прогиб (max 44 мм);

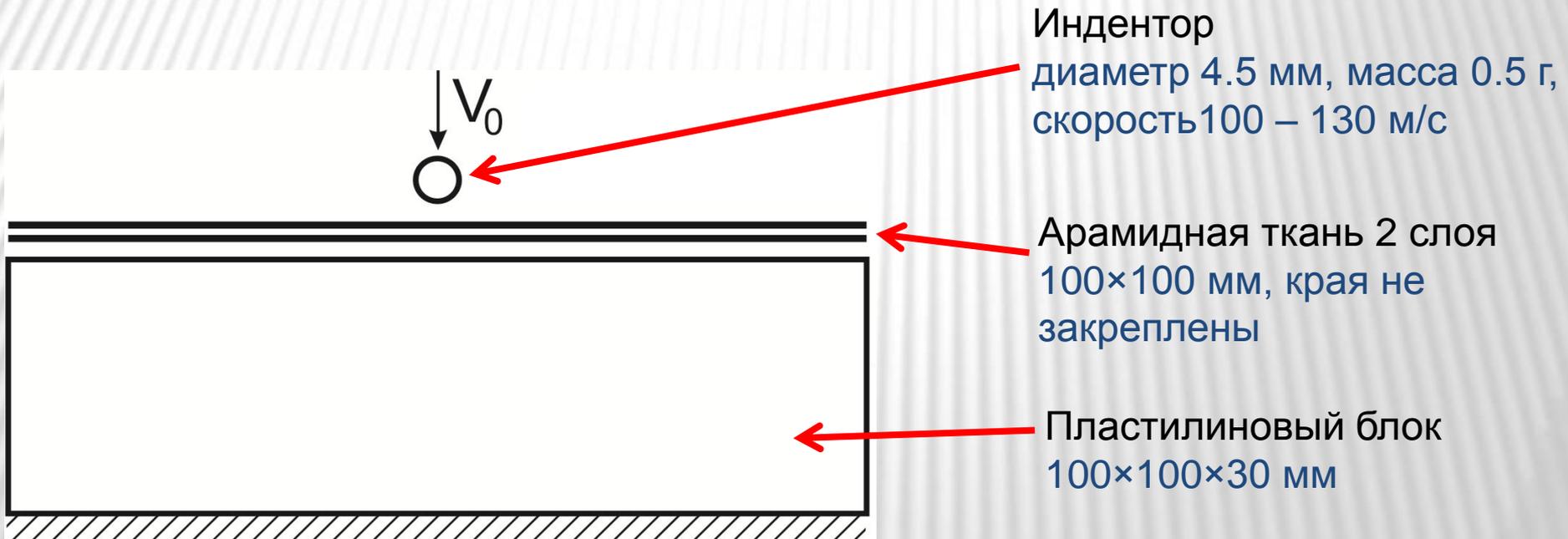
$V_0$  – начальная скорость пули;  $V_k$  – скорость пули после пробоя.

Требуется 10 пластин; всего 120 выстрелов;  
Из всех выстрелов пластина должна  
остановить 60 пуль и минимум 30 раз  
должен произойти пробой

Требуется 8 пластин;  
6 выстрелов в одну пластину;  
Температура пластилина  $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

# СХЕМА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение величины прогиба тыльной стороны двух слоев баллистической ткани с поверхностной обработкой и без нее, расположенных на регистрирующей среде при локальном ударе



# БАЛЛИСТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

- Выстрелы проведены из пневматического пистолета ИЖ53М
- Скорость шарика фиксировали хронографом S04 с погрешностью  $\pm 1$  м/с
- Разрыв нитей в ткани отсутствовал, рассеяние энергии пули происходило за счет вытягивания нитей и деформирования пластилина

Деформирование 2-х слоев ткани  
с поверхностной обработкой ПВА



Деформирование технического  
пластилина



# РЕЗУЛЬТАТЫ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

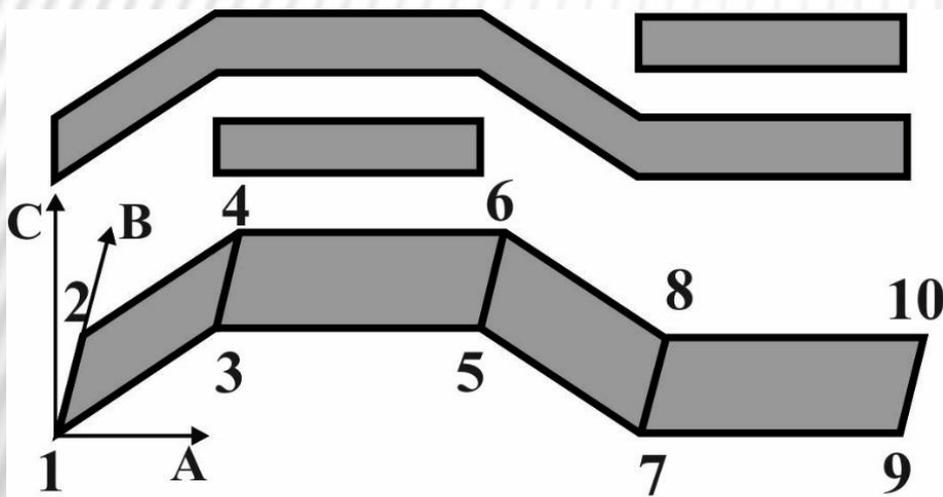
Поверхностная обработка позволяет снизить величину прогиба тыльной стороны баллистических тканей

№	Наименование	Утяжеление	Снижение прогиба
1	Ткань без поверхностной обработки	–	–
2	Водная эмульсия ПВА	5,1%	37,4%
3	ПВА-Т с температурной обработкой при +98°C	5,1%	35%
4	Канифоль сосновая В10	3,1%	32%

# МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ТКАНИ С ПОВЕРХНостНОЙ ОБРАБОТКОЙ

В пакете программ LS-DYNA разработана модель деформирования и разрушения баллистических тканей, состоящих из отдельных нитей с поверхностной обработкой и без нее

Повторяющийся элемент геометрии  
нити (полотняное переплетение)



Толщина нитей – 50 мкм  
Ширина – 410 мкм  
Тип конечных элементов – SHELL

# МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ТКАНИ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

## Характеристики материала нитей

Параметр	Обозначение	Величина
Модули упругости, Па	$E_A$	$1.4 \cdot 10^{11}$
	$E_B, E_C$	$1.4 \cdot 10^{10}$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	1 440
Коэффициент Пуассона	$\mu_{AB}, \mu_{BC}, \mu_{AC}$	0.001
Модули сдвига, Па	$G_{AB}, G_{BC}$	$1.4 \cdot 10^{10}$
	$G_{CA}$	$4 \cdot 10^7$

- Материал нитей – ортотропный
- Модуль упругости вдоль нити  $E_A$  определен экспериментально
- $E_B, E_C, G_{AB}, G_{BC}, \mu_{AB}, \mu_{BC}, \mu_{AC}$  приняты согласно рекомендациям из литературы
- В модели было использовано три точки интегрирования по толщине нити для учета изгиба
- Трансверсальный модуль сдвига  $G_{CA}$  влияет на величину сопротивления изгибу, определен сравнением расчетных и экспериментальных зависимостей нагрузки от перемещения при вытягивании нити из ткани без поверхностной обработки

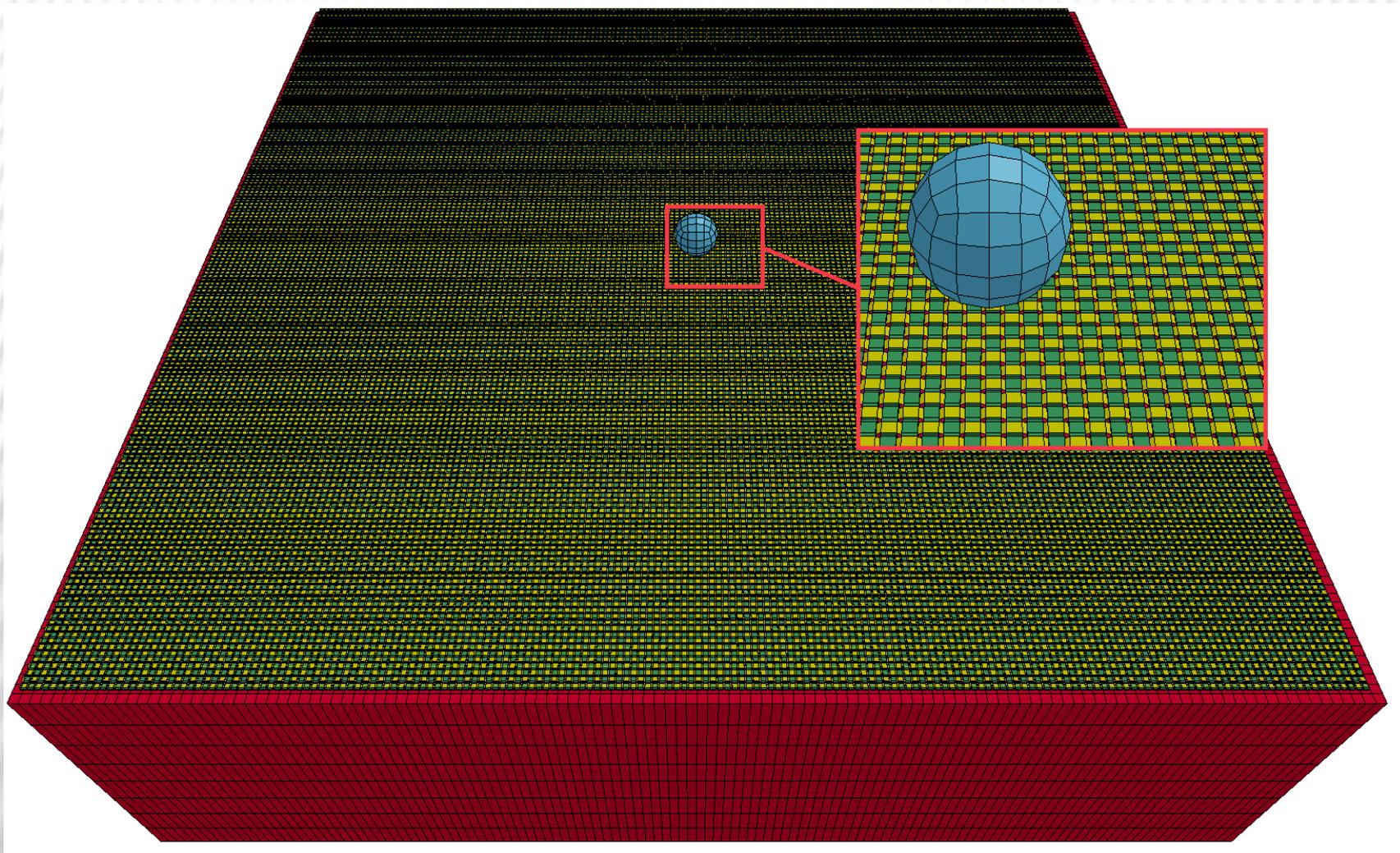
# МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ТКАНИ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

- Статический коэффициент трения для ткани без обработки – 0,174 (определен экспериментально)
- Поверхностная обработка тканей в моделях учитывалась соответствующим изменением величины статического коэффициента сухого трения:
  - Проведены расчеты по вытягиванию нити из ткани с варьированием статического коэффициента трения таким образом, чтобы расчетные зависимости «нагрузка – перемещение» совпали с экспериментальными для всех видов поверхностной обработки
  - Статический коэффициент трения для тканей с обработками ПВА, ПВА-Т, Канифолью – 0,261
  - Масса поверхностной обработки в модели была присоединена к массе нитей

# МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ТКАНИ С ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКОЙ

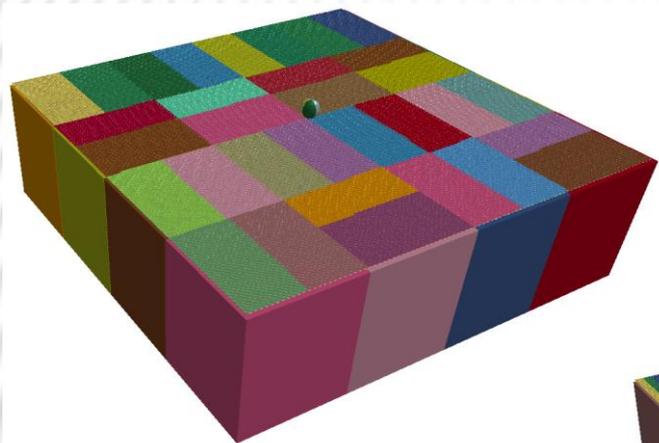
- Материал индентора – абсолютно жесткий
- Материал регистрирующей среды (технического пластилина) – вязкоупругий с зависимостью предела текучести от скорости деформирования. Параметры для модели материала были определены экспериментально:
  - Модуль упругости  $E$  – 20 МПа
  - Коэффициент Пуассона  $\mu$  – 0.45
  - Плотность  $\rho$  – 1400 кг/м<sup>3</sup>

# СЕТКА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

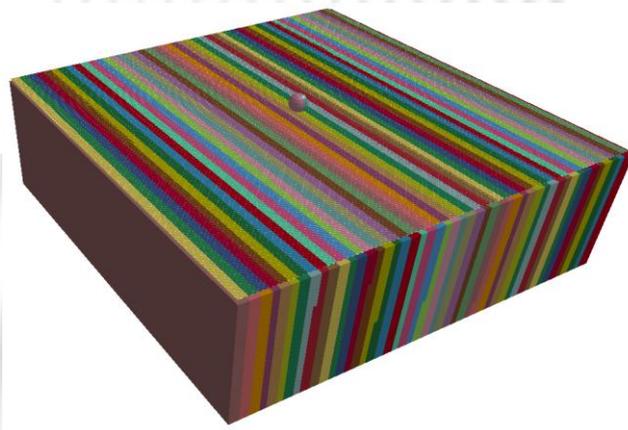


# СПОСОБЫ ДЕКОМПОЗИЦИИ МОДЕЛИ

- Расчеты выполнены на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ»
- Ткань без пропитки



Автоматическое  
распараллеливание  
модели

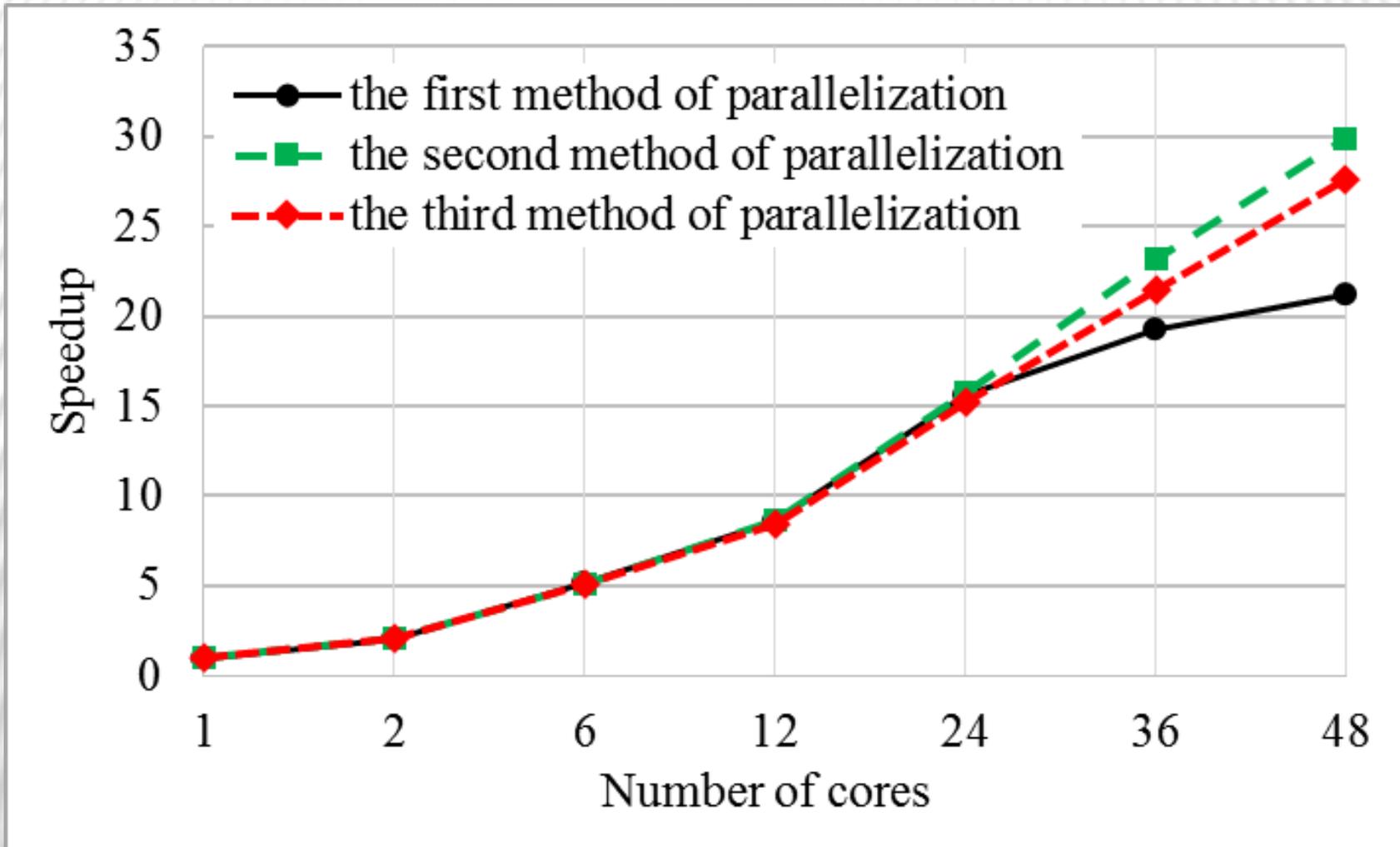


Декомпозиция на полосы,  
проходящие через всю  
толщину



Декомпозиция в  
цилиндрической  
системе координат

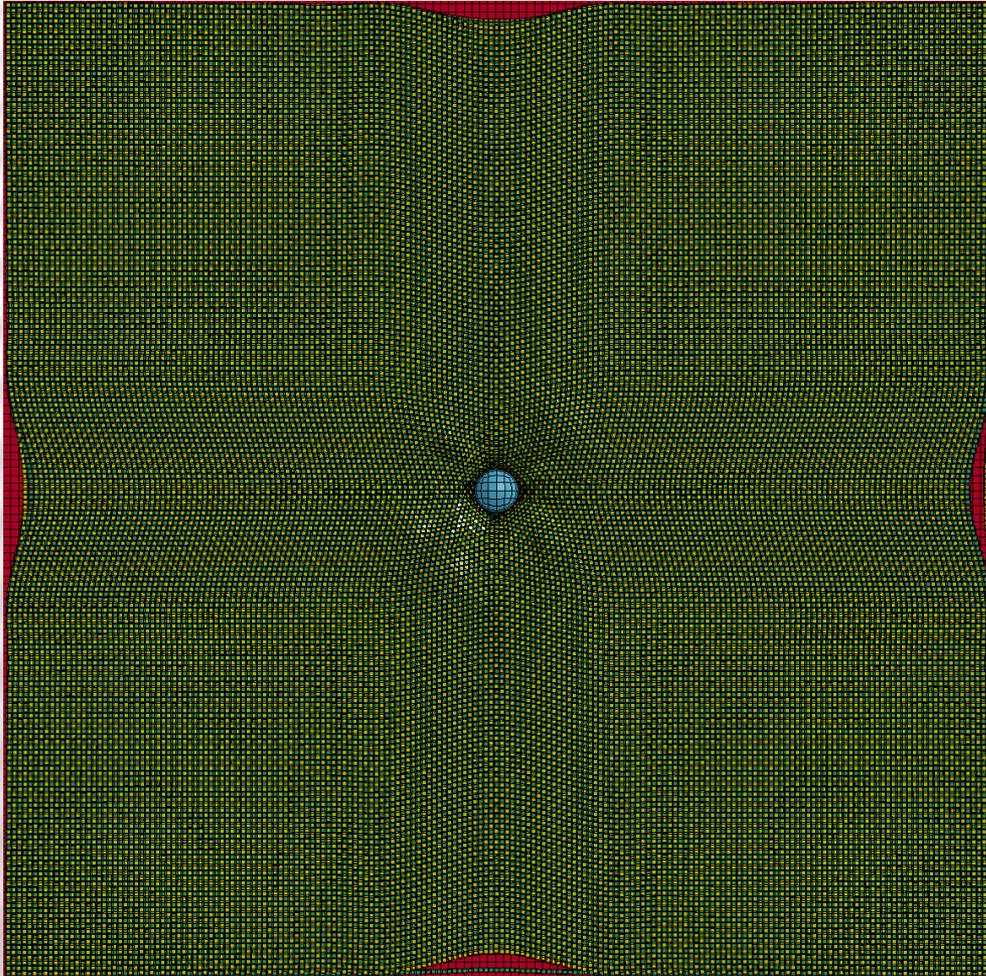
# УСКОРЕНИЕ



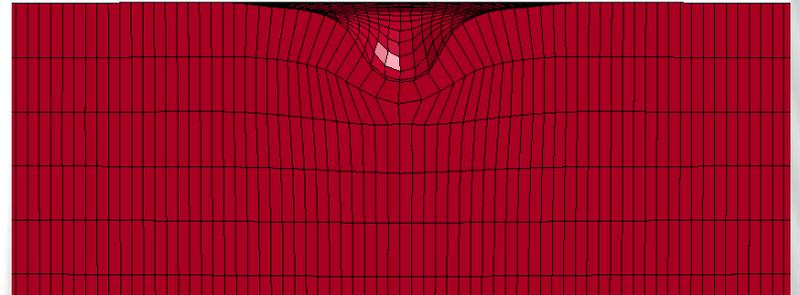
Время решения задачи на одном ядре составляет 269 793 с

# ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОСЛЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ИНДЕНТОРОМ

2 слоя ткани (P110) с поверхностной  
обработкой ПВА



Технический пластилин



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

- Разработаны численно эффективные модели по определению глубины вмятины в регистрирующей среде (техническом пластилине) при локальном ударе в баллистические ткани с поверхностными обработками и без нее
- Поверхностную обработку ткани в модели учитывали изменением одного параметра – коэффициента сухого трения
- Расчетные и экспериментальные данные по глубинам вмятин в пластилине хорошо согласуются между собой

---

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**