

# Моделирование ударных процессов в тканевых бронежилетах и теле человека на вычислительном кластере «СКИФ Урал»\*

Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников, А.А. Маричева

Работа посвящена численному моделированию ударных процессов в тканевых бронежилетах и теле человека. Построена модель скелета грудной клетки человека. Проведены численные эксперименты по исследованию масштабируемости задач динамического взаимодействия индентора с тканевыми преградами различных размеров и разным количеством слоев, а также динамического взаимодействия индентора со скелетом грудной клетки человека при помощи пакета программ LS-DYNA.

## 1. Введение

Основной задачей при проектировании бронежилетов является минимизация их массы при сохранении заданного уровня защиты. Проверка качества бронежилета не находящегося в контакте с защищаемым объектом проводится с определением баллистического предела [1]. А если бронежилет контактирует с защищаемым объектом (тело человека), то в этом случае существует критерий определения тупой травмы, который применяется для сравнения бронежилетов различных классов (рис. 1) [2,3].



1 - многослойная тканевая преграда (бронежилет); 2 - регистрирующая среда; W - фактический прогиб.

Рис. 1. Сертификационные испытания бронежилетов

В экспериментах в качестве тела человека используют либо технический пластилин (при этом довольно сложно оценить степень травмирования тела человека), либо дорогостоящие экспериментальные модели грудной клетки [4]. Экспериментально-аналитический путь оптимизации конструкции многослойных тканевых преград позволяет достаточно быстро определить оптимальное соотношение параметров для фиксированного воздействия (конкретных формы индентора и скорости нагружения), однако этот метод весьма затратный [5].

Чисто аналитических моделей, точно описывающих процесс динамического взаимодействия пули и бронежилета с учетом разрушения, на данный момент не существует и, очевидно, их получение невозможно из-за сложности физических явлений, происходящих в этом процессе: большие перемещения, скольжение, фрикционные контакты, повышение температуры. Для того чтобы учесть эти сложные физические явления, необходимо учитывать структуру баллистической ткани. В России при изготовлении бронежилетов используют баллистические ткани различных типов переплетения: полотняное, саржевое, сатиновое. В то же время нити в баллистической ткани состоят из множества волокон. В первых работах, посвященных численному исследованию взаимодействия бронежилета с пулей, баллистические ткани заменяли мембраной, затем использовали сетки со связанными узлами. Для исследования поведения конструкций имеющих тканую структуру в ряде работ из ткани выделяют повторяющийся элемент, моделируют его с высокой степенью точности, изучают его свойства при различных видах нагружения, затем полученные параметры используют для расчета таких конструкций, моделируя их

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-07-96007-р\_урал\_a).

как сплошную среду [6]. Такой подход применительно к расчету взаимодействия бронезилета с пулей не подходит, т.к. в этом случае происходит значительное вытягивание и разрыв нитей. С развитием вычислительных возможностей в настоящее время можно моделировать баллистическую ткань с точностью до нити [7, 8, 9]. В некоторых работах каждая нить моделируется очень точно с учетом формы поперечного сечения объемными элементами [7], но данные модели содержат большое количество конечных элементов, что не позволяет рассчитать пакеты больших размеров (30x30 см) с несколькими слоями ткани даже с использованием суперкомпьютеров.

При разработке бронезилетов необходимо иметь представление о механизме повреждений, которые возникают в теле человека при локальных ударных воздействиях. Поэтому учеными разных стран ведется работа по созданию теоретических и экспериментальных моделей тела человека, которые в точности повторяют форму человеческого тела и обладают такими же свойствами. Учеными Университета имени Джона Хопкинса в США (Вашингтон) были созданы конечно-элементная и экспериментальная модели грудной клетки человека, были построены ребра, грудина, хрящи, позвоночник, сердце, легкие, печень, желудок, мышцы и кожа [4]. Если значения ускорений, полученные экспериментально и с помощью расчета, близки, то отличие давлений существенно. Таким образом, разработки теоретических и экспериментальных моделей грудной клетки человека активно продолжаются, однако какие-либо достоверные данные пока получены не были. К тому же были созданы только модели деформирования тела человека без учета степени травмирования.

Для того чтобы использовать численную модель грудной клетки человека для проектирования бронезилетов необходимо знать механические свойства всех ее элементов. Идентификацию параметров грудной клетки можно провести, сопоставив экспериментальные и расчетные перемещения при статическом нагружении, и ускорений, спектра собственных частот колебаний при динамическом нагружении. При этом динамическое нагружение грудной клетки реального человека должно быть низкоскоростным, чтобы не нанести травм человеку.

Реальный бронезилет 2-го класса [2] состоит из 60-70 слоев баллистической ткани. Типичный размер бронепанели тканевого бронезилета составляет 30x30 см. Для ткани полотняного переплетения количество точек контакта нитей утка и основы составляет 400 тыс. в одной ткани. Для всего бронезилета (65 слоев) количество контактов возрастает до 25 млн. И это не считая контактов между слоями в процессе ударного взаимодействия. По различным оценкам общее число контактов может достичь 40 млн. Такие задачи не могут быть в принципе решены на персональных компьютерах. Даже на высокопроизводительных вычислительных кластерах придется вводить некоторые упрощения. Эти упрощения сводятся к замене группы одинаковых по конструкции слоев одним, эквивалентным по массе. Основная проблема состоит в определении максимального количества слоев в группе без потери качества результата расчета. Имеющиеся данные по прогнозу величины баллистического предела малослойных (до 10 слоев) тканевых пакетов показывают, что наличие трех эквивалентных слоев (вместо 10 оригинальных) позволяет получить ошибку расчета в пределах 2%, что приемлемо, учитывая высокую ответственность таких изделий [10]. Следует отметить, что бронепанели, имеющие в своем составе до 10 слоев можно моделировать и рассчитывать на вычислительных кластерах типа «СКИФ Урал» без введения упрощений типа объединения ряда слоев в один эквивалентный по массе.

В настоящей статье мы рассматриваем моделирование динамического взаимодействия индентора с тканевыми преградами различных размеров и разным количеством слоев, а также динамического взаимодействия индентора со скелетом грудной клетки человека на вычислительном кластере «СКИФ Урал». Статья организована следующим образом. В разделе 2 приведена постановка задачи. В разделе 3 описываются методы исследования, и приводится описание задачи. В разделе 4 обсуждаются результаты проведенных экспериментов на вычислительном кластере. В заключении суммируются основные результаты, полученные в данной работе.

## 2. Постановка задачи

Были рассмотрены тканевые пакеты полотняного переплетения (рис. 2) из одного и пяти слоев ткани размером 5x5 см, а также размером 30x30 см. В работе использована арамидная

ткань СВМ арт. 5601. В расчетной модели нити имеют относительную свободу перемещения с возможностью вытягивания с учетом сухого трения. Рассматривали нити, которые имеют прямоугольное поперечное сечение и были представлены одним оболочечным элементом по ширине с одной точкой интегрирования по толщине и выполнены из ортотропного материала с малыми поперечно-сдвиговыми свойствами. Нити в расчетной модели могли разрушаться. Края ткани не были закреплены. В расчете индентор имел форму цилиндра с полусферическим основанием диаметром 7 мм, массой 5,5 г, с начальной скоростью 450 м/с (имитация пули пистолета ТТ) и был выполнен из абсолютно жесткого материала.

При создании модели грудной клетки человека были введены следующие упрощения: ребро представляло собой вытянутое по определенной траектории тело с эллиптическим поперечным сечением; поперечный размер ребра плавно увеличивался от позвонка к реберному хрящу; каждый позвонок имел форму призмы с эллиптическим основанием. Размеры позвонков увеличивались от верхних к нижним; поперечные, суставные и остистые отростки были исключены; мечевидный отросток грудины был исключен. В расчетах предполагали, что каждое ребро жестко соединено с верхней частью одного позвонка; реберные хрящи истинных ребер жестко соединены с грудиной; реберный хрящ каждого ложного ребра жестко соединен с верхним реберным хрящом. В модели были запрещены все перемещения и повороты в плоскости самого нижнего поясничного позвонка, также были запрещены перемещения вдоль оси нагружения 5, 6, 7 позвонков сверху. Индентор имел форму цилиндра диаметром 3 см, массой 1 кг и был выполнен из абсолютно жесткого материала, его начальная скорость равнялась 5 м/с.

Туловище человека принято делить на три отдела: верхний, средний и нижний. В расчетах используется масса только верхнего и половины среднего отделов. Статистические исследования показывают, что масса верхнего отдела составляет 15,9% от массы тела, масса среднего отдела – 16,3%. Модель грудной клетки человека соответствует человеку ростом 150 см с хватом грудной клетки 640 мм. Вес такого человека около 50 кг. Тогда масса двух отделов туловища составляет 12 кг. Это вес костей, мышц, кожи и внутренних органов. При расчете все внутренние органы, а также некоторые кости, которые расположены в верхнем отделе туловища (лопатки, ключицы и плечевые кости), не рассматривали. В итоге вес скелета грудной клетки, кожи и мышц оказался равен 5,0 кг. Чтобы в расчете учесть массу мягких тканей, плотность кости была увеличена.

### 3. Методы исследования

Для решения задачи динамического взаимодействия индентора с тканевыми преградами с помощью пакета программ LS-DYNA геометрия и сетка конечных элементов были созданы в пакете программ ANSYS. Повторяющийся элемент ткани показан на рис. 3, где отмечены номера ключевых точек, координаты которых были введены в ANSYS, после чего по ключевым точкам были заданы соответствующие поверхности. Далее набор поверхностей был размножен до получения необходимых размеров модели, после чего была построена сетка конечных элементов (рис. 4).

Количество элементов, получившееся при создании сетки, представлено в таблице 1.

**Таблица 1.** Количество элементов.

	5x5 см, 1слой	5x5 см, 5слоев	30x30см, 1слой	30x30см, 5слоев
Количество элементов	20 000	77 600	547 296	2 714 080

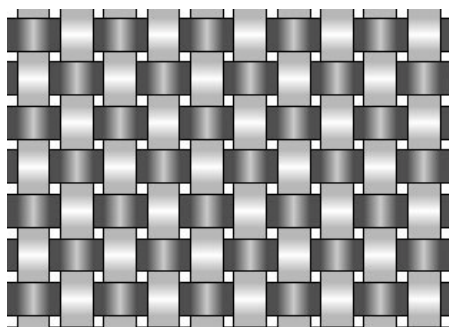


Рис. 2. Полотняное переплетение

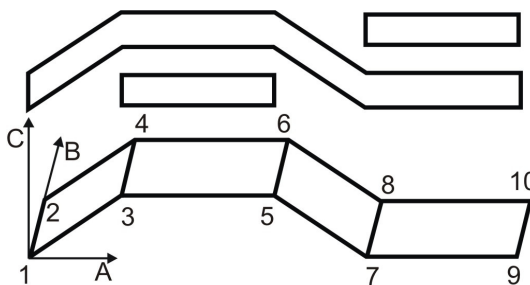


Рис. 3. Повторяющийся элемент

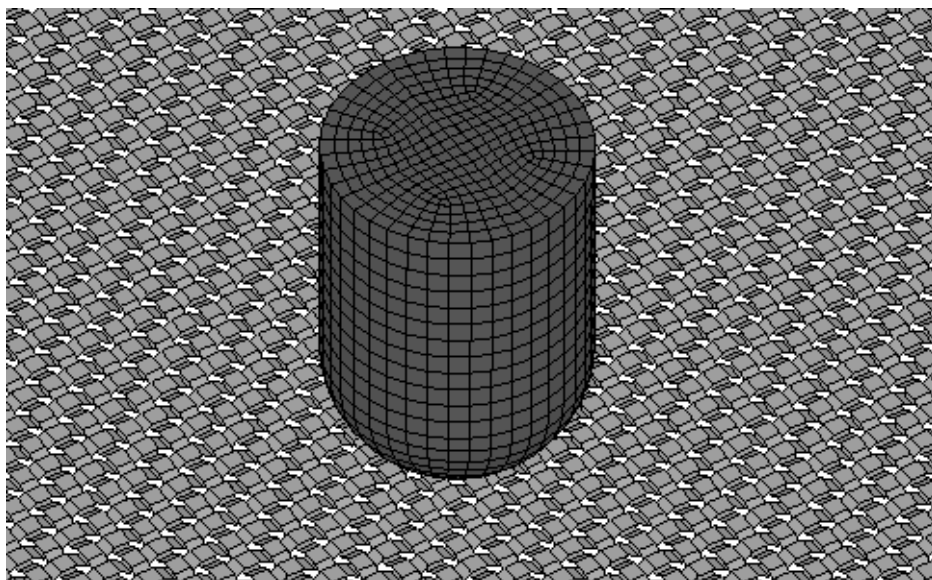


Рис. 4. Сетка конечных элементов (полотняное переплетение)

Из списка материалов, предложенных пакетом программ LS-DYNA [11], для индентора был выбран \*MAT\_RIGID для нитей – \*MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE. Характеристики нитей для ввода в программу LS-DYNA приведены в табл. 2. Принято, что разрушение нити происходит при достижении в ней заданной величины первого главного напряжения 3 ГПа (определено экспериментально). Механические свойства нитей и тканей определены на универсальной испытательной машине Instron 5882.

Таблица 2. Характеристики нитей.

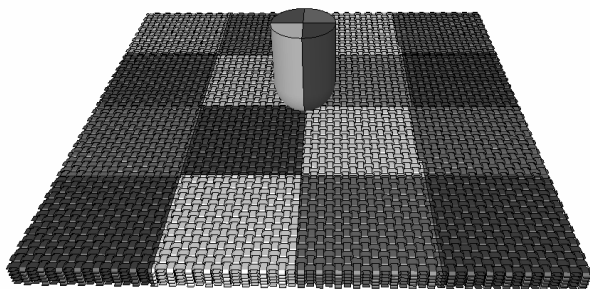
Параметр	Обозначение	Величина
Толщина нити, мкм	$T$	100
Ширина нити, мкм	$D$	500
Модули упругости, МПа	$EA$	$1,3 \cdot 10^5$
	$EB$	$1 \cdot 10^3$
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	1 440
Коэффициент Пуассона	$\mu_{AB}$	0,003
Модули сдвига, МПа	$GAB$	$1 \cdot 10^3$
	$GBC$	$1 \cdot 10^3$
	$GCA$	$1 \cdot 10^3$

Контакт объектов моделировался командой \*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE с коэффициентом трения 0,4, характерным для типичных нитей CBM, применяемых в бронежилетах. Расчет динамики был проведен от момента удара до времени  $t = 60$  мкс.

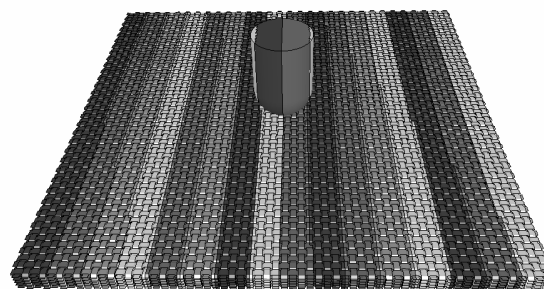
Верификация модели была проведена ранее в работе [10], результаты численных расчетов отлично согласуются с экспериментальными исследованиями.

На примере пакета из 5 слоев ткани размером 5x5 см были рассмотрены три различных способа декомпозиции модели на шестнадцать процессорных ядрах. В первом случае модель была разбита на прямоугольные области, проходящие через всю толщину пакета (рис. 5); во втором – на полосы, расположенные вдоль одной из сторон пакета и также проходящие через всю толщину пакета (рис. 6); в третьем случае – декомпозиция была проведена также на полосы расположенные вдоль одной из сторон пакета, при этом каждая полоса разбивалась еще и по толщине пакета (рис. 7).

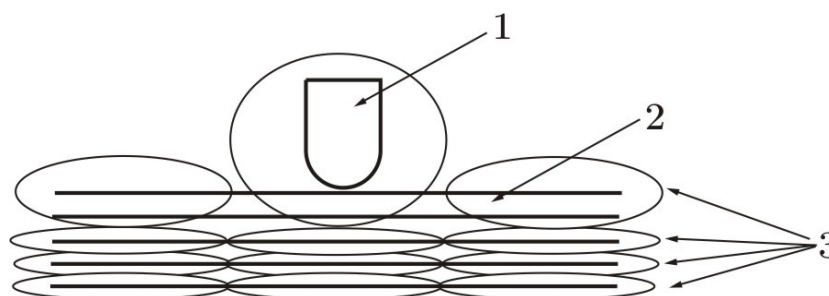
Было получено, что время расчета при использовании 1-го и 2-го способа декомпозиции одинаково, а для 3-го в 2,5 раза больше чем в первых двух. Это объясняется тем, что контакт между слоями обрабатывается на разных ядрах, что повышает межпроцессорные обмены и увеличивает время расчета. В результате все дальнейшие расчеты были проведены с использованием 1-го способа декомпозиции (рис. 5).



**Рис. 5.** Первый способ декомпозиции модели (16 ядер)



**Рис. 6.** Второй способ декомпозиции модели (16 ядер)

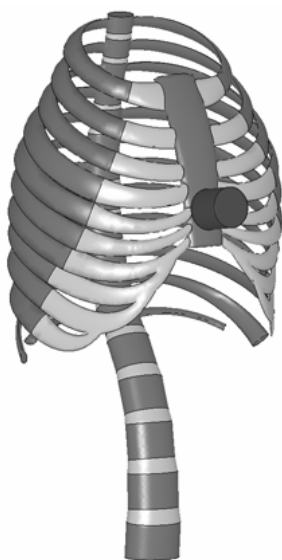


1 - пуля; 2 - пакет из 5 слоев ткани размером 5x5 см (вид сбоку); 3 - области декомпозиции.

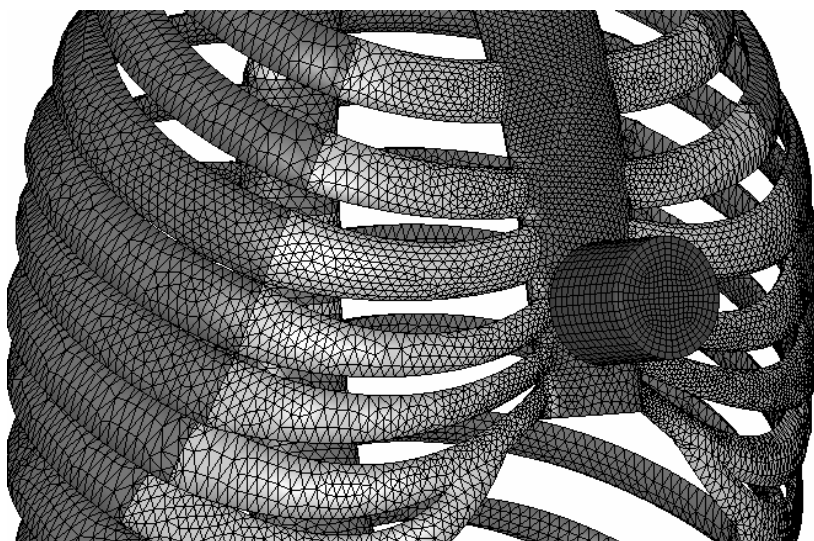
**Рис. 7.** Третий способ декомпозиции модели (16 ядер)

С помощью пакета SolidWorks построена модель скелета грудной клетки. Смоделированы ребра (12 пар), грудина, грудные позвонки (12), поясничные позвонки (5), межпозвоночные диски и реберные хрящи (рис. 8).

Для решения задачи с помощью пакета программ LS-DYNA сетка конечных элементов была создана в пакете программ ANSYS (рис. 9). Количество элементов, получившееся при создании сетки равно 211 112.



**Рис. 8.** Модель скелета грудной клетки человека



**Рис. 9.** Сетка конечных элементов

Модули упругости материалов костей и хрящей представлены в таблице 3 и были взяты из литературы [12], при этом в расчете плотность кости увеличили для того чтобы учесть массу мягких тканей. Из списка материалов, предложенных пакетом программ LS-DYNA [11], для индентора был выбран \*MAT\_RIGID для костей и хрящей \*MAT\_ELASTIC (упругий). Расчет динамики был проведен от момента удара до времени  $t = 30$  мс.

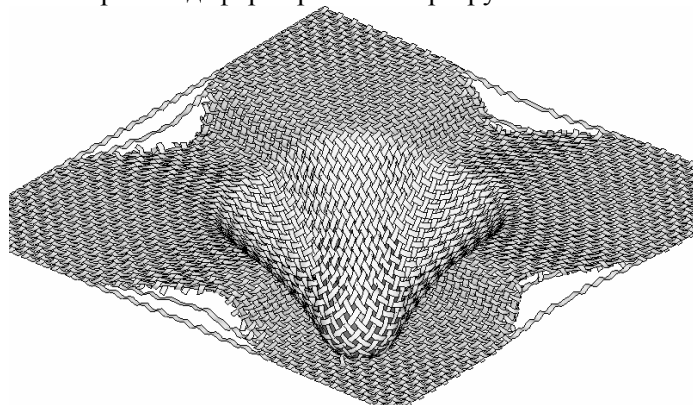
**Таблица 3.** Механические свойства материалов кости и хряща.

Материал	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона
кость	15 000	8 000	0,3
хрящ	1 800	40	0,4

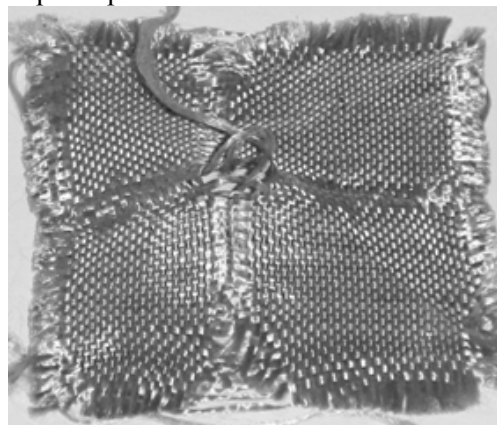
#### 4. Результаты исследований и их анализ

Расчеты были проведены на высокопроизводительном вычислительном кластере «СКИФ Урал» [13], оснащенный 166 вычислительными узлами с 2 процессорами Intel Xeon E5472 (4 ядра по 3.0 ГГц) и 8 ГБ оперативной памяти на каждом узле.

Расчеты были проведены с использованием одного, двух, четырех и восьми ядер с узла вычислительного кластера «СКИФ Урал». На рис. 10 и 11 показаны расчетные и экспериментальные картины деформирования и разрушения 1 слоя ткани размером 5x5 см и 30x30 см.

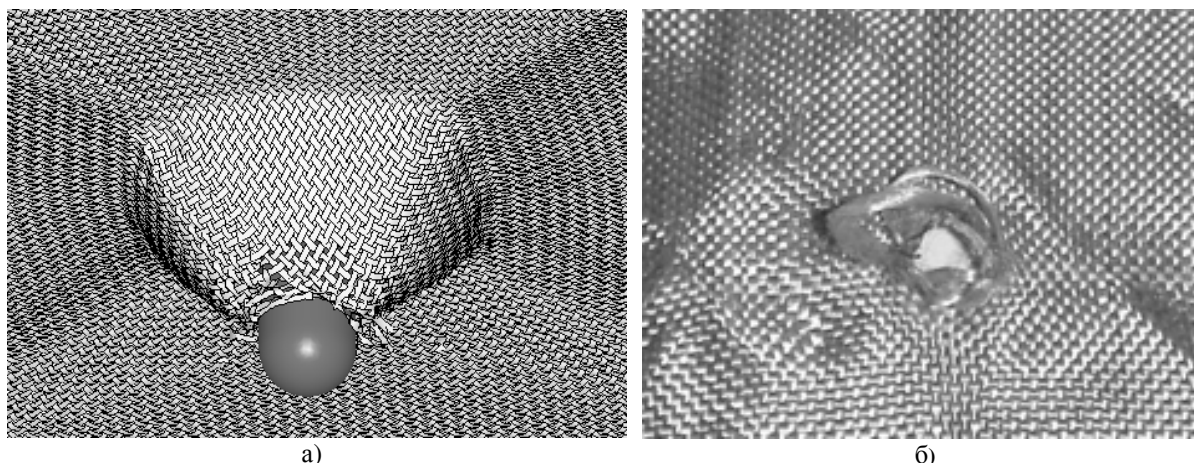


а)



б)

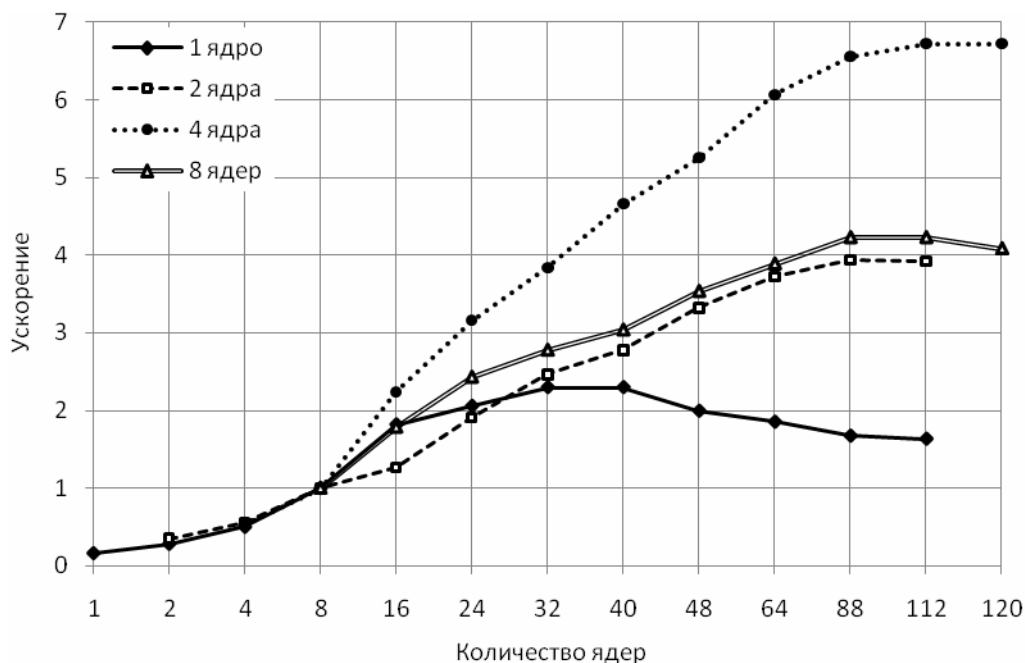
**Рис. 10.** Сопоставление расчетных а) и экспериментальных б) данных по деформированию однослойных образцов тканей размером 5x5 см



**Рис. 11.** Сопоставление расчетных а) и экспериментальных б) данных по пробую однослойных образцов тканей размером 30x30 см

Было получено, что тканевые пакеты размером 30x30 см пробиваются, а тканевые пакеты размером 5x5 см не пробиваются. Это связано с тем, что после контакта пули с тканевым пакетом первое главное напряжение в нитях постоянно возрастает, в небольших по размеру пакетах ударная волна быстрее доходит до края пакета и возвращается, разгружая место контакта.

На примере задачи с одним слоем ткани размером 30x30 см показано сравнение ускорений при расчете с использованием одного, двух, четырех и восьми ядер с узла вычислительного кластера «СКИФ Урал» (рис. 12). Ускорение вычислялось по формуле  $T1/Tn$ , где  $T1$  – время, затраченное на решение теста на восьми процессорных ядрах,  $Tn$  – время, затраченное на решение этой же задачи на  $n$  процессорных ядрах.



**Рис. 12.** Сравнение ускорений на вычислительном кластере «СКИФ Урал» при использовании 1, 2, 4 и 8 ядер с узла (1 слой ткани размером 30x30 см)

Было получено, что наилучшая масштабируемость получается при использовании четырех ядер с узла. Время расчета при использовании 4-х ядер с узла в среднем на 20% меньше по сравнению со временем расчета при использовании 1, 2, 8 ядер с узла.

Графики ускорений при использовании 1, 2, 4, 8 ядер с узла качественно похожи. Поэтому приведены результаты на примере использования 4-х ядер с узла (рис. 13 и 14). На рис. 13 приведены графики ускорений, где  $T1=4$ , а на рис. 14  $T1=24$ . Пакет из 5 слоев ткани размером

30x30 см не считается меньше чем на 24 ядрах и больше чем на 92 ядрах. Это связано с выделением оперативной памяти на каждое ядро для решения задачи, а также с тем, что декомпозиция задачи производится на одном узле, на котором максимум 8 Гб оперативной памяти.

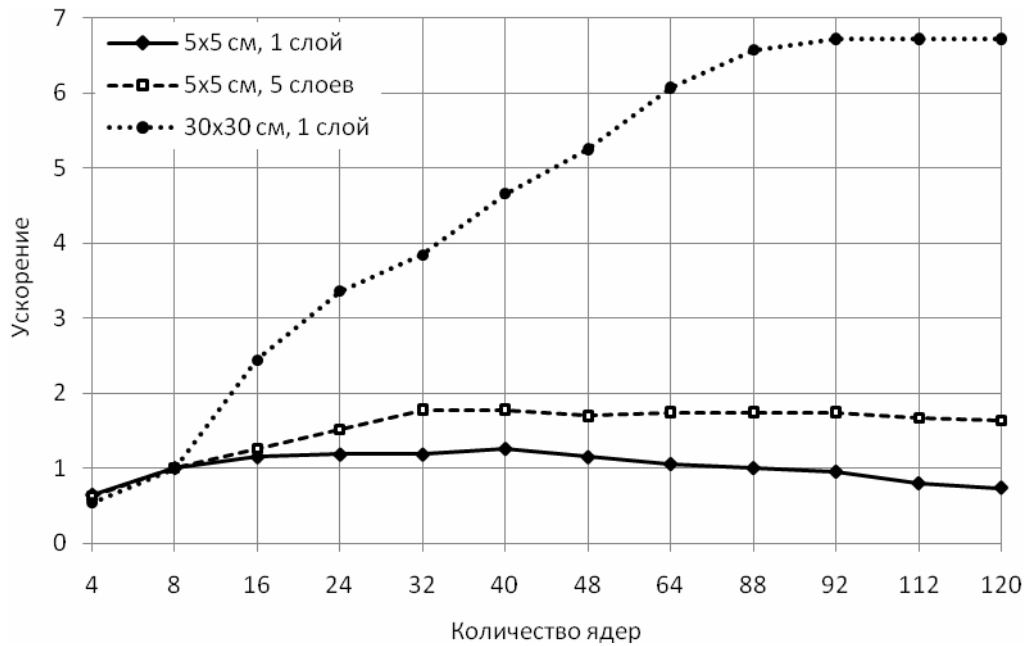


Рис. 13. Сравнение ускорений на вычислительном кластере «СКИФ Урал» (4 ядра с узла, T1=4)

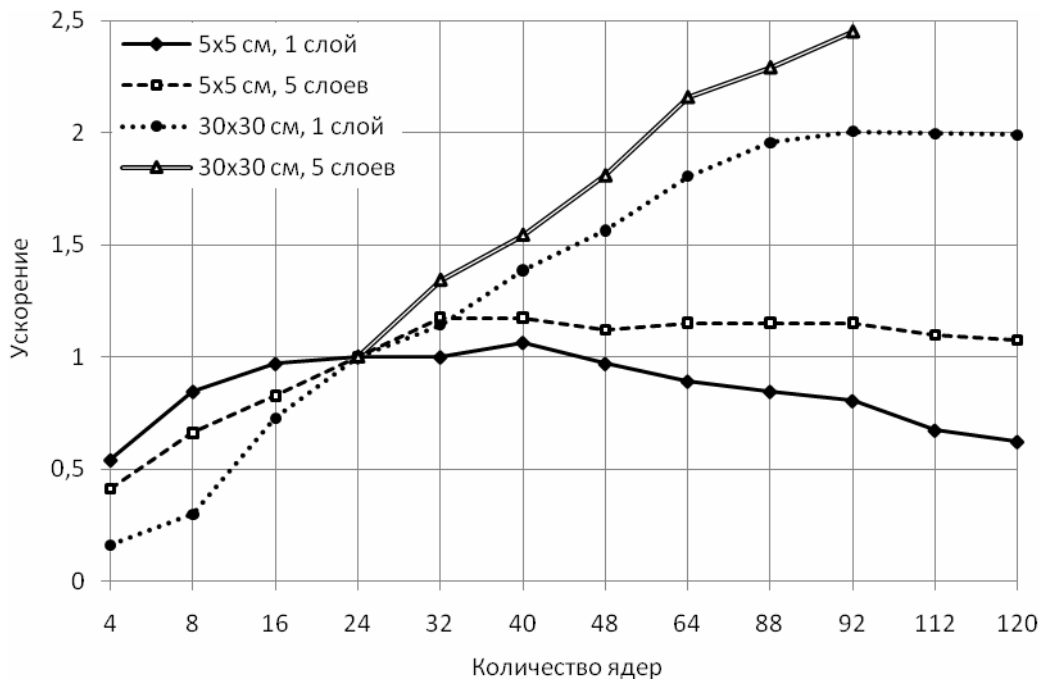


Рис. 14. Сравнение ускорений на вычислительном кластере «СКИФ Урал» (4 ядра с узла, T1=24)

Время, за которое были произведены расчеты по динамическому взаимодействию индентора и различных тканевых пакетов с использованием 4-х ядер с узла, приведено в таблице 4.

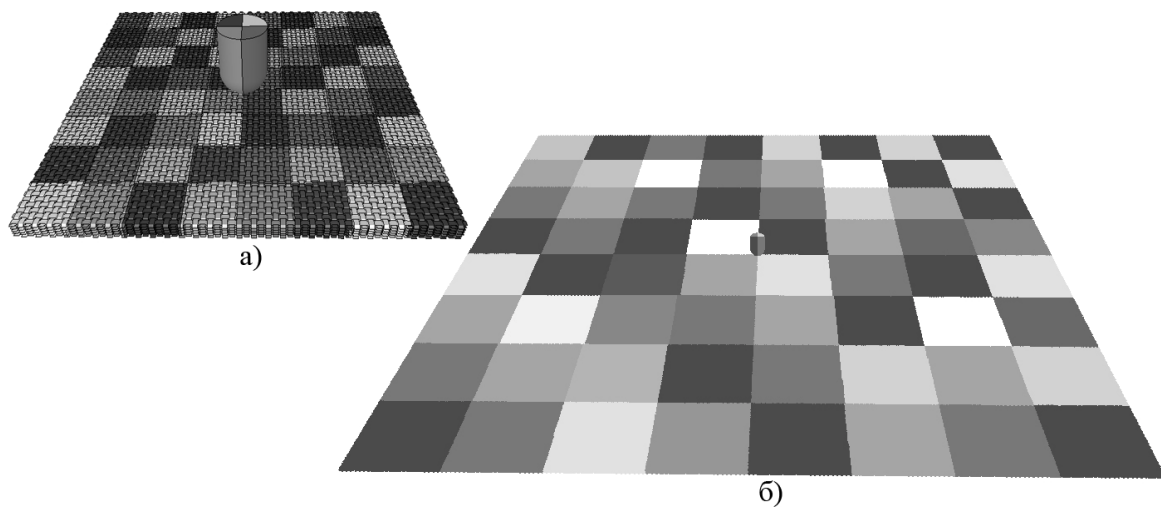
Таблица 4. Время выполнения расчетов с использованием 4-х ядер с узла.

№ п.п.	Вычислительных ядер	Время выполнения, сек.			
		5x5 см, 1 слой	5x5 см, 5 слоев	30x30 см, 1 слой	30x30 см, 5 слоев
1	4	61	592	4 987	-



2	8	39	368	2 688	-
3	16	34	294	1 100	-
4	24	33	243	800	6 326
5	32	33	207	700	4 713
6	40	31	206	577	4 100
7	48	34	217	512	3 500
8	64	37	212	443	2 934
9	88	39	211	409	2 764
10	92	41	212	399	2 584
11	112	49	221	401	-
12	120	53	226	402	-

В расчетах рассматривалось одинаковое воздействие (пуля, ее скорость и время процесса) на различные объекты, отличающиеся размером и количеством слоев. В этих случаях результаты воздействия были принципиально разными: наличие или отсутствие сквозного пробоа, сохранение или исчезновение контакта с пулей, множественные контакты разорванных нитей с соседними нитями и даже с нитями из других слоев. Эти явления могут объяснить относительно хорошую масштабируемость для многослойных пакетов и сравнительно низкую для однослойных пакетов. Для пакетов больших размеров (30x30 см) относительно хорошая масштабируемость по сравнению с пакетами меньших размеров (5x5 см) объясняется тем, что на один процессор приходится больший объем материала и, соответственно, меньшие межпроцессорные обмены в зоне контакта индентора с тканевым пакетом, где происходит разрушение и вытягивание нитей (рис. 15).



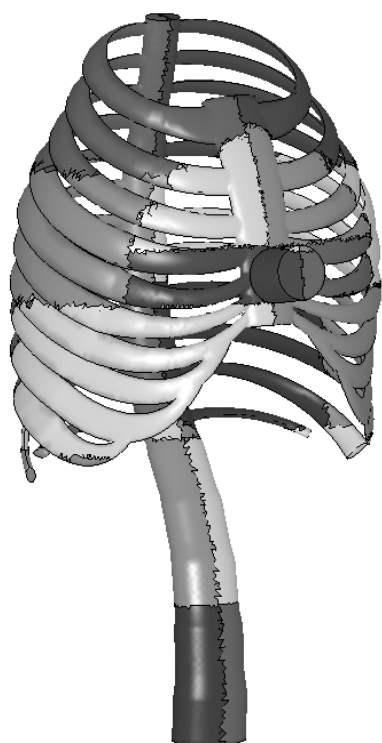
а) пакет размером 5x5 см; б) пакет размером 30x30 см

**Рис. 15.** Декомпозиция модели (64 ядра).

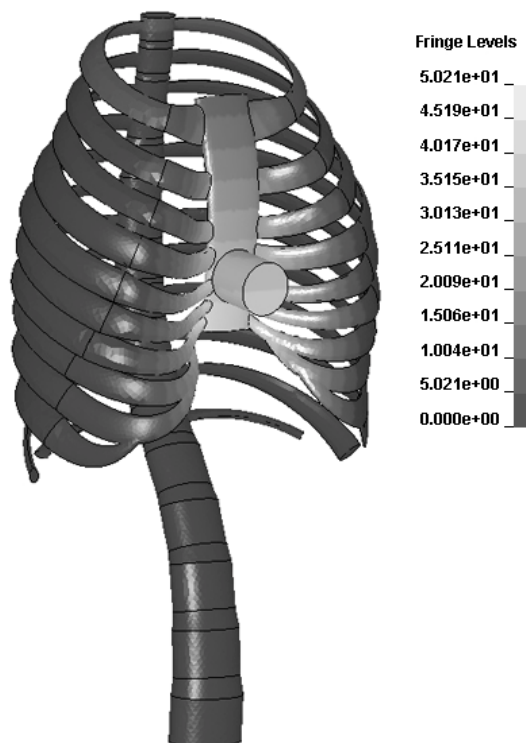
Использование большого количества процессоров заставляет разбивать объект на небольшие зоны, в которых происходит разрушение нитей и множественные контакты между элементами из разных зон, что заставляет усиливать межпроцессорные обмены и снижает, в итоге, масштабируемость. В пакете программ LS-DYNA нет такой функции как сгущение при декомпозиции модели, с помощью которой можно было бы увеличить области декомпозиции возле контакта пули с тканевым пакетом.

Декомпозиция модели скелета грудной клетки человека на примере 16 ядер показана на рис. 16. Перемещения индентора и элементов грудной клетки показано на рис. 17.

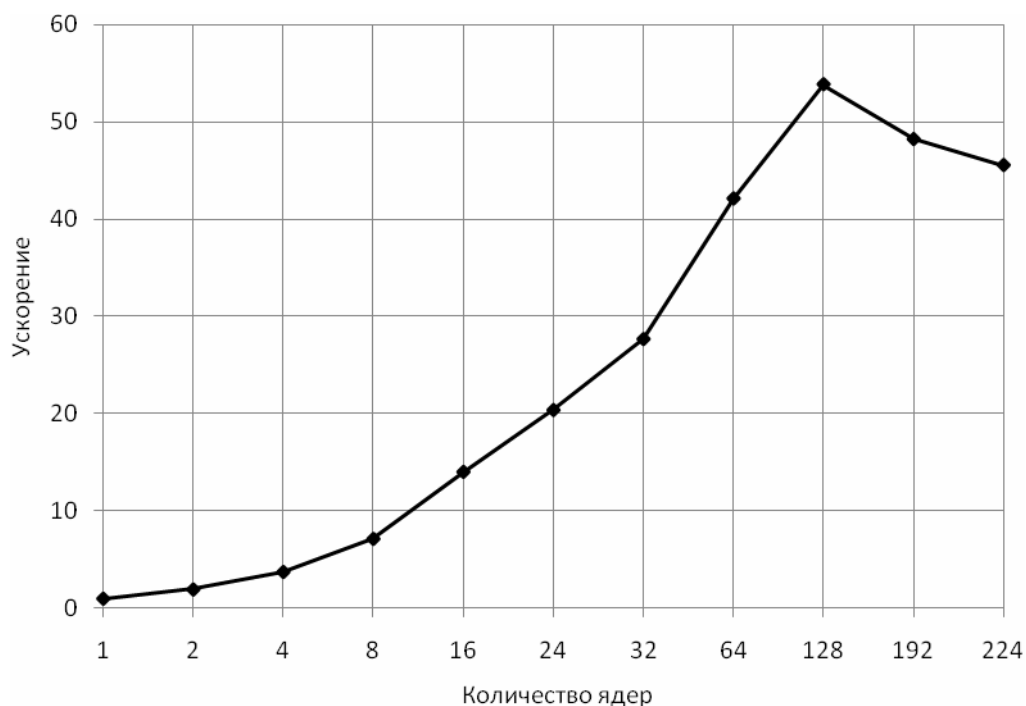
Ускорение для задачи динамического взаимодействия индентора со скелетом грудной клетки человека вычислялось по формуле  $T1/Tn$ , где  $T1$  – время, затраченное на решение теста на одном процессорном ядре,  $Tn$  – время, затраченное на решение этой же задачи на  $n$  процессорных ядрах (рис. 18).



**Рис. 16.** Декомпозиция модели (16 ядер)



**Рис. 17.** Перемещения индентора и элементов грудной клетки (значения на шкале указаны в мм)



**Рис. 18.** Ускорение

Время, за которое были произведены расчеты по динамическому взаимодействию индентора и скелета грудной клетки человека, приведено в таблице 5.

**Таблица 5.** Время выполнения расчетов на вычислительном кластере «СКИФ Урал».

№ п.п.	Вычислительных ядер	Время выполнения, сек.
1	1	497 921

2	2	256 300
3	4	132 947
4	8	69 716
5	16	35 508
6	24	24 437
7	32	19 386
8	64	11 827
9	128	9 250
10	192	10 330
11	224	10 935

При рассмотрении задачи о деформировании грудной клетки при низкоскоростном ударе индентором отмечается хорошая масштабируемость вплоть до 128 ядер. Далее эффективность распараллеливания снижается из-за распределения индентора и области контакта с грудиной на несколько ядер, что приводит к увеличению межпроцессорных обменов и увеличению времени расчета.

## 5. Заключение

Вычислительные возможности кластеров позволяют решать сложные контактные задачи, в которых нельзя использовать механику сплошной среды, т.к. результаты получаются неадекватными. В таких задачах необходимо создавать геометрически подобную модель и рассматривать взаимодействие этой модели не только с внешними воздействиями, но и между элементами внутри этой модели. Это задачи ударного взаимодействия тканевого бронежилета с пулей, геологические задачи обработки почвы, моделирование схода лавин, компактирование (уплотнение) порошков и др. В задаче ударного взаимодействия тканевого бронежилета с пулей мы рассматривали нити как сплошную среду, в реальности же каждая нить состоит еще из порядка 150-200 волокон, которые также взаимодействуют между собой. В таких задачах важно создать такую геометрически подобную модель, чтобы результаты расчетов согласовывались с экспериментом, но в то же время не усложнять модель настолько, что ее невозможно будет решать и на суперкомпьютерах.

В данной работе были проведены численные эксперименты по исследованию масштабируемости задач динамического взаимодействия индентора с тканевыми преградами различных размеров и разным количеством слоев, а также динамического взаимодействия индентора со скелетом грудной клетки человека при помощи пакета программ LS-DYNA. Для пакетов больших размеров (30x30 см) относительно хорошая масштабируемость по сравнению с пакетами меньших размеров (5x5 см) объясняется тем, что на один процессор приходится больший объем материала и, соответственно, меньшие межпроцессорные обмены в зоне контакта индентора с тканевым пакетом, где происходит разрушение и вытягивание нитей. Использование большого количества процессоров заставляет разбивать объект на небольшие зоны, в которых происходит разрушение нитей и множественные контакты между элементами из разных зон, что заставляет усиливать межпроцессорные обмены и снижает, в итоге, масштабируемость.

При рассмотрении задачи о деформировании грудной клетки человека при низкоскоростном ударе индентором отмечается хорошая масштабируемость вплоть до 128 ядер. Далее эффективность распараллеливания снижается из-за распределения индентора и области контакта с грудиной на несколько ядер, что приводит к увеличению межпроцессорных обменов и увеличению времени расчета.

Задача динамического взаимодействия индентора со скелетом грудной клетки человека масштабируется намного лучше, чем задачи ударного нагружения тканевых пакетов различных размеров и разным количеством слоев ткани. Это объясняется тем, что в тканевых пакетах возникают множественные контакты между нитями внутри одного слоя и между нитями из разных слоев ткани, в то время как контакт между скелетом грудной клетки человека и индентором

происходит по небольшой поверхности. Таким образом, задачи с множественными контактами масштабируются хуже.

В результате проведенных исследований по масштабируемости задач было получено, что декомпозицию объектов необходимо обеспечивать таким образом, чтобы контактные зоны приходились на минимальное количество ядер, назначать минимально возможное количество контактирующих объектов.

Полученные нами результаты и методы исследования сопротивления тканевых преград ударам огнестрельного оружия используются при разработке новых средств защиты тела человека, значительно сокращая этап предварительной оценки служебных свойств такого рода изделий.

## Литература

1. Recht, R.F. Analytical modeling of plate penetration dynamics. / R.F. Recht // High velocity impact dynamics / Jonas A. Zucas., R.F. Recht. - New York, Wiley, 1990.- 443-515 pp.
2. ГОСТ P50744-95. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования.
3. NIJ Standard - 0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor.
4. Jack C. Roberts, Paul J. Biermann, James V. O'Connor, Emily E. Ward, Russell P. Cain, Bliss G. Carkhuff, Andrew C. Merkle. Modeling nonpenetrating ballistic impact on a human torso // Johns hopkins apl technical digest, volume 26, number 1, 2005.
5. Григорян В.А., Маринин В.М., Хромушин В.А. Расчетная оценка противоосколочной стойкости тканевых защитных структур на основе характеристик энергоемкости // Тезисы докладов VIII Международной конференции "Новейшие тенденции в области конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты" (15-16 сентября 2005, г. Хотьково). - Хотьково, 2005. - с.14-15.
6. Ivanov D.S., Baudry F., Van Den Broucke B., Lomov S.V., Xie H., Verpoest I. Failure analysis of triaxial braided composite // Composites Science and Technology. - 2008. Т. 68. № 1.
7. H. Broos, K. Herlaar. Explicit FE modeling of ballistic impact on textile armour systems// Finite element modelling of textiles and textile composites, St-Petersburg, 2007, CD edition
8. Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б. Связь динамической прочности арамидных тканей с искривлением нитей в них. // Наука и технологии., Труды XXV Российской школы и XXXV Уральского семинара, посвященных 60-летию Победы. М.: 2005. - с.103-110.
9. Сапожников С.Б., Долганина Н.Ю., Сахаров С.А. Моделирование динамики взаимодействия ударника и многослойного тканевого пакета // Вопросы оборонной техники, сер. 15, Композиционные и неметаллические материалы в машиностроении.- М.: МНЦ "Информтехника". - 2005. - Вып.3(140)-4(141), с.38-41.
10. Sapozhnikov S.B., Forental M.V., Dolganina N.Yu. Improved methodology for ballistic limit and blunt trauma estimation for use with hybrid metal/textile body armor. // Finite element modelling of textiles and textile composites, St-Petersburg, 2007, CD edition
11. LS-DYNA Keyword user's manual. v.970. LSTC, 2003. - 1564p.
12. Разрушение. Том 7. Разрушение неметаллов и композитных материалов. Часть II. Органические материалы (стеклообразные полимеры, эластомеры, кость). Под редакцией Ю.Н. Работнова. Издательство «Мир», Москва 1976.
13. Высокопроизводительный вычислительный кластер «СКИФ Урал»: [[http://supercomputer.susu.ru/computers/ckif\\_ural/](http://supercomputer.susu.ru/computers/ckif_ural/)].