

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНДЕНТОРА С ТКАНЕВЫМИ БРОНЕПЛАСТИНАМИ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ НА ПЛАСТИЛИНОВОМ ОСНОВАНИИ

Н.Ю. Долганина

Рассматривается суперкомпьютерное моделирование динамического взаимодействия индентора и тканевых бронепластин, состоящих из 1 – 5 слоев ткани размером 10x10 см с возможностью разрушения нитей, расположенных на пластилиновом основании. Определены механические характеристики регистрирующей среды (технического пластилина). Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: суперкомпьютерное моделирование, конечно-элементная модель, удар, регистрирующая среда, тканевая бронепластина.

Введение

Проверка тканевого бронезиления на прочность в стандартах разных стран – это обстрел бронепластин стандартными пулями контрольного оружия на основании, имитирующем тело человека (специальный пластилин) [1, 2]. Оценка последствий удара пули в бронезиление, надетый на человека, осуществляется путем сопоставления размеров вмятины, оставленной пластиной бронезиления на пластилине, с уровнем травмирования тела человека.

При ударе пули в тканевый бронезиление возникают сложные физические явления, связанные с большими перемещениями, скольжениями, фрикционными контактами, повышением температуры, пластическими деформациями, учесть которые в простых экспериментально-аналитических подходах ранее было невозможно [3]. Для более адекватного описания этого процесса в настоящее время используют численные методы, в частности, МКЭ-пакет LS-DYNA [4-7].

В данной работе проведено сопоставление расчетных (LS-DYNA) и экспериментальных данных по взаимодействию ударника с тканевыми бронепластинами, расположенными на пластилиновом основании.

Статья организована следующим образом. В разделе 1 приведена постановка задачи. В разделе 2 описываются методы исследования, и приводится описание задачи. В разделе 3 обсуждаются результаты проведенных исследований. В заключении суммируются основные результаты, полученные в данной работе.

1. Постановка задачи

Проведено суперкомпьютерное моделирование натуральных экспериментов: удар индентором в тканевую бронепластину, расположенную на пластилиновом основании. Определены механические свойства регистрирующей среды (технического пластилина). Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

Были рассмотрены бронепластины, состоящие из 1 – 5 слоев ткани полотняного переплетения размером 10x10 см. В работе использована ткань из арамидных нитей Русар. 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. Тканевая бронепластина располагалась на неподвижном пластилиновом основании. В расчете индентор имел сферическую форму диаметром 4,5 мм и массой 0,5 г, с начальной скоростью 100 м/с и был выполнен из абсолютно жесткого материала.

2. Методы исследования

Чтобы снизить размерность задачи при расчете, геометрия нитей была предельно упрощена. Криволинейная ось нити была заменена ломаной, с прямолинейными горизонтальными участками и наклонными (34° к горизонтальному участку нити). Повторяющийся элемент ткани полотняного переплетения показан на рис. 1, где отмечены номера ключевых точек, координаты которых были введены в программу ANSYS, после чего по ключевым точкам были заданы соответствующие поверхности. Далее набор поверхностей был размножен до получения необходимых размеров модели.

Для решения задачи динамического взаимодействия тканевой бронепластины, расположенной на регистрирующей среде и жесткого индентора с помощью пакета программ LS-DYNA геометрия и сетка конечных элементов (рис. 2) (к-файл) были созданы в пакете программ ANSYS с последующей коррекцией.

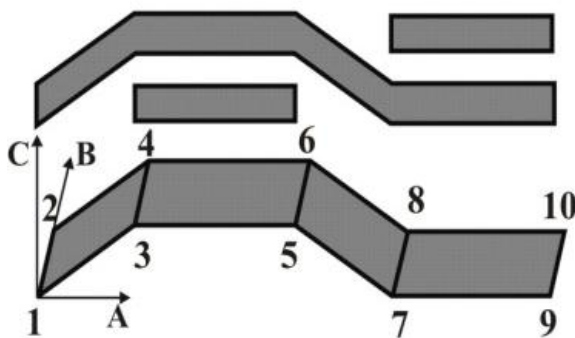


Рис. 1. Повторяющийся элемент

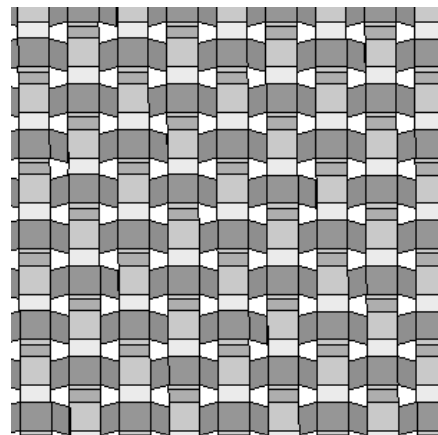


Рис. 2. Сетка конечных элементов

Реальная арамидная нить Русар номинальной линейной плотности 58,8 текс состоит из нескольких сотен элементарных волокон диаметром 12 – 15 мкм, которые имеют крутку 100 м^{-1} (зарубежные нити, как правило, некрученые). Для материала нити наиболее близкой является модель ортотропного упругого тела, в которой высокая жесткость имеет место в продольном направлении нити и на несколько порядков меньшая в поперечном и сдвиговом направлениях. Нити моделировали оболочечными элементами с одной точкой интегрирования по толщине Белычко-Вонга-Чанга (тип 10) [8].

Принято, что разрушение нити происходит при достижении в ней величины первого главного напряжения $\sigma_1 = 3 \text{ ГПа}$. Эта величина соответствует средней прочности исследованных арамидных нитей.

В пакете программ LS-DYNA представлено более сотни моделей материала [8], наиболее интересными для нас были малопараметрические модели, их анализ показал, что для нитей наиболее подходит материал *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DA-

MAGE, позволяющий задать ортотропные свойства нитей и учесть разрушение при достижении первого главного напряжения равным 3 ГПа (табл. 1).

Таблица 1

Механические характеристики нитей

Параметр	Обозначение	Величина
Толщина нити, мкм	T	100
Модуль упругости, МПа	E_x	$1,4 \cdot 10^5$
	E_y	$1,4 \cdot 10^3$
Плотность, кг/м ³	ρ	1440
Коэффициент Пуассона	μ_{xy}	0,3
Модуль сдвига, МПа	G_{xy}	$1,4 \cdot 10^3$
	G_{yz}	$1,4 \cdot 10^3$
	G_{zx}	$1,4 \cdot 10^3$

В конечно-элементной модели ткани нити имеют относительную свободу перемещения и возможность вытягивания с учетом сухого трения. Контакт объектов моделировали командой *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE с коэффициентом сухого трения 0,4, характерным для арамидных нитей [9].

Стальной индентор при взаимодействии с тканевой бронепластиной при исследуемых скоростях до 110 м/с не разрушается и не имеет пластических деформаций, поэтому для сокращения времени расчетов для него был выбран материал *MAT_RIGID (жесткое тело) с плотностью $\rho = 7800$ кг/м³ и модулем упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па.

Для того чтобы построить адекватную модель регистрирующей среды (технического пластилина), необходимо экспериментально определить ее механические свойства. Модуль упругости регистрирующей среды (технического пластилина) был определен из испытаний на квазистатическое сжатие цилиндрических образцов (диаметр 20 мм, высота 40 мм) на машине INSTRON 5882 со скоростями нагружения 5, 50, 250 и 500 мм/мин (рис. 3). Обработка начальных участков кривых деформирования дала значение $E = 0,7 \pm 0,1$ МПа. Плотность пластилина $\rho \approx 1800$ кг/м³.

Для определения зависимости предела текучести от скорости деформирования был поставлен эксперимент на низкоскоростной удар (рис. 4). Цилиндрический образец из пластилина, соединенный соосно со стальным грузом-цилиндром, бросали с разных высот $H = 0,5 - 2$ м на жесткое неподвижное основание. После удара была измерена остаточная длина образца. Скорость соударения V_0 была определена из равенства потенциальной и кинетической энергий (тепловые эффекты были незначительными) $mgH = mV_0^2/2$, где g – ускорение свободного падения, м/с²; m – масса груза и пластилина, кг.

Движение цилиндра (груза) считали равнозамедленным. С учетом введенных допущений среднюю скорость деформации образца из пластилина можно определить по зависимости: $\varepsilon \approx \frac{\Delta l}{l_0} \cdot \frac{1}{t} = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot \frac{V_0}{2\Delta l} = \frac{V_0}{2l_0}$, где l_0 – начальная длина пластилинового цилиндра, м; t – время, с.

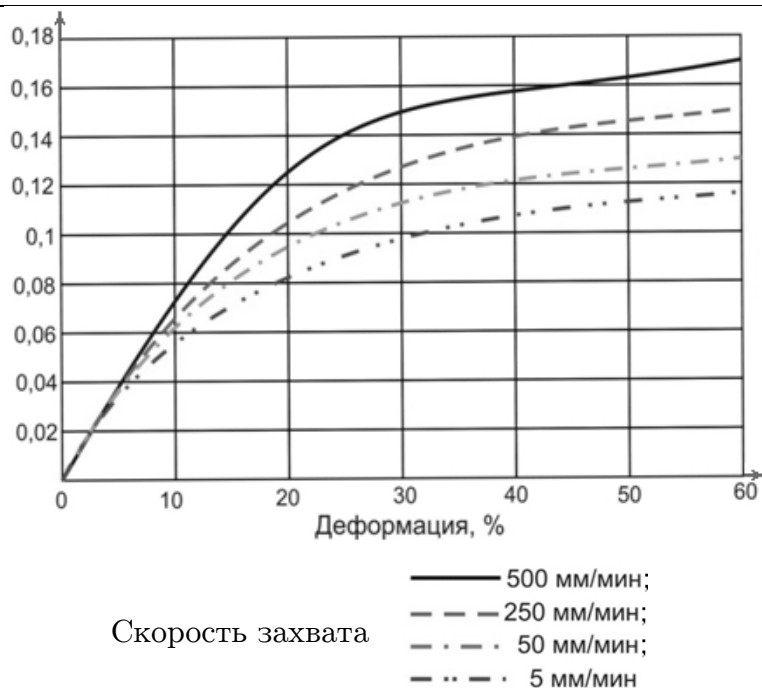


Рис. 3. Диаграммы деформирования цилиндрических образцов из пластилина с различными скоростями нагружения при сжатии

Так как в пластилиновом образце при ударе возникают большие пластические деформации, то для определения предела текучести упругим участком диаграммы деформирования пренебрегали (материал – жесткопластический). Предел текучести можно найти из равенства потенциальной энергии работе внутренних сил: $mgH = \sigma_T \Delta l S$, где σ_T – предел текучести; S – площадь поперечного сечения цилиндра из пластилина.

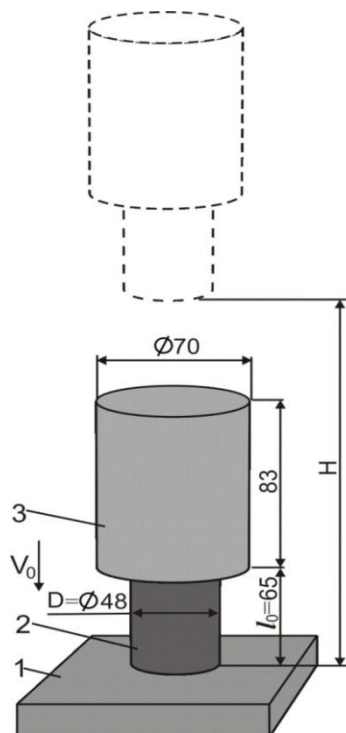


Рис. 4. Схема испытания на сжатие цилиндрических образцов из пластилина:
1 – жесткое неподвижное основание; 2 – цилиндр из пластилина; 3 – стальной цилиндр

По полученным в эксперименте значениям предела текучести σ_T была построена степенная функция зависимости σ_T (МПа) от скорости деформирования $\dot{\epsilon}$ (1/с) с показателем меньше единицы $\sigma_T(\dot{\epsilon}) = 0.94(\dot{\epsilon})^{0.15}$. Температура пластилина при испытаниях была (21 ± 1) °С.

Материал технического пластилина в модели считали упругопластическим с зависимостью предела текучести от скорости деформирования. Из списка материалов, заложенных в библиотеку пакета LS-DYNA, для технического пластилина был выбран *MAT_STRAIN_RATE_DEPENDENT_PLASTICITY, который позволяет учесть зависимость предела текучести от скорости деформирования в табличном виде [8].

3. Результаты исследований и их анализ

Расчеты динамического взаимодействия индентора с тканевыми бронепластинами (полотняное переплетение), состоящих из одного, двух, трех, четырех и пяти слоев ткани размером 10x10 см с возможностью разрушения нитей, расположенных на пластилиновом основании размером 10x10x5 см были проведены на суперкомпьютере «СКИФ – Аврора ЮУрГУ» [10], который используется для вычисления большого количества индустриальных задач [11].

В натурном эксперименте выстрелы производились из пневматического пистолета ИЖ-53 в центр бронепластины под прямым углом. Скорость индентора составляла (100 ± 5) м/с, ее измеряли хронографом S044 с погрешностью 1 м/с. Индентор имел сферическую форму диаметром 4,5 мм и массой 0,5 г, материал – сталь. По каждой бронепластине было сделано не менее 3-х выстрелов. После каждого выстрела были проведены измерения глубины отпечатков, оставленных бронепластиной на основании из пластилина (табл. 2). Различие расчетных и экспериментальных глубин вмятин не превышает 4 %.

Таблица 2

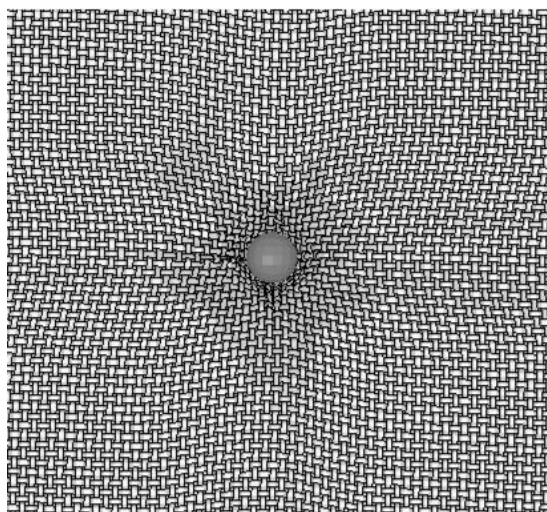
Сравнение расчетных и экспериментальных данных. Глубина вмятин в регистрирующей среде после выстрела

Количество слоев в бронепластине	Глубина отпечатка, мм		Погрешность, %
	Среднее экспериментальное значение	Расчетное значение	
1	10,0	9,6	4
2	6,0	5,8	3
3	5,0	4,9	2
4	4,4	4,4	0
5	5,2	5,2	0

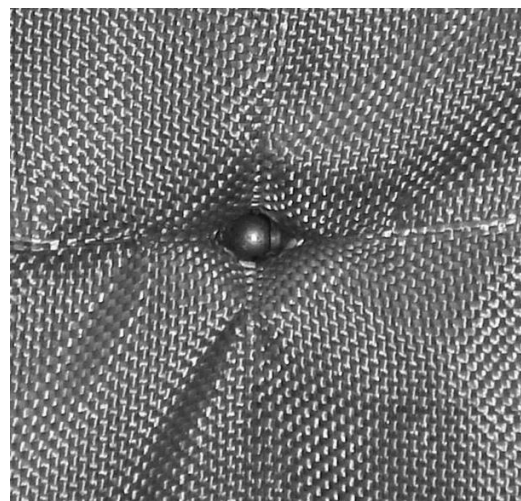
Сравнение расчетных и экспериментальных картин деформирования бронепластины из двух слоев ткани показано на рис. 5.

Как видно из рис. 5 характер деформирования тканевой бронепластины в расчетном и экспериментальном исследованиях одинаков. На рис. 5 видно, что в расчете и

эксперименте происходит вытягивание нитей, которые оказались расположенными под индентором.



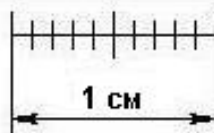
Расчет



Эксперимент

Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных картин деформирования тканевой бронепластины (два слоя ткани)

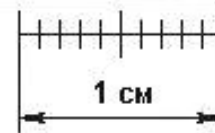
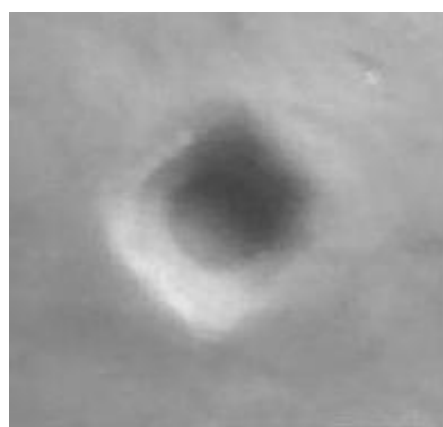
Сравнение расчетных и экспериментальных картин деформирования основания (формы и глубины вмятин) при деформировании бронепластины из двух слоев ткани показано на рис. 6.



Форма вмятины, расчет



Глубина вмятины, расчет



Форма вмятины, эксперимент



Глубина вмятины, эксперимент

Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных картин деформирования основания (формы и глубины вмятин) при деформировании бронепластины из двух слоев ткани

Заключение

Рассмотрено локальное динамическое деформирование многослойной тканевой бронепластины, расположенной на пластилиновом основании (МКЭ, пакет LS-DYNA) и проведено сопоставление с экспериментом. Показано, что форма и размеры вмятин, полученные расчетным методом, отлично согласуются с экспериментальными данными.

Показана возможность использования модели упругопластического тела с пределом текучести, зависящим от скорости нагружения для замены технического пластилина (регистрирующей среды, имитирующей реакцию тела человека на локальный удар).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 12-08-31184 мол_а и № 10-07-96007-р_урал_а.

Литература

1. ГОСТ Р 50744 – 95. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования. Прин. Постановлением Госстандарта России от 27.02.95 № 82. Введ. с изм. № 1, 2. Утвержден в сент. 1998 г., мае 2002. – М.: ИПК изд-во стандартов, 2003. – 8 с.
2. National Institute of Technology Standard, NIJ Standard 0101.06 Ballistic Resistance of Body Armor. – July, 2008.
3. Бова, В.Г. Концепция построения мягкого бронежилета для максимальной реализации свойств арамидных нитей / В.Г. Бова // Рабочая одежда и средства индивидуальной защиты. – 2001. – № 2(10). – С. 11 – 15.
4. Nilakantan, G. Using LS-DYNA[®] to Computationally Assess the V₀-V₁₀₀ Impact Response of Flexible Fabrics Through Probabilistic Methods / G. Nilakantan, M. Keefe, E.D. Wetzel, T.A. Bogetti, R. Adkinson, J.W. Gillespie // 11th International LS-DYNA[®] Users Conference: Proceedings of the International Users Conference (06-08 June 2010, Detroit). – 2010. – P. 5-1 – 5-12.
5. Долганина, Н.Ю. Оценка баллистического предела и прогиба многослойных тканевых пластин при ударе индентором / Н.Ю. Долганина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Машиностроение". – 2010. – Вып. 15. – № 10(186). – С. 17–23.
6. Долганина, Н.Ю. Моделирование ударных процессов в тканевых бронежилетах и теле человека на вычислительном кластере "СКИФ Урал" / Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников, А.А. Маричева // Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии. – 2010. – Т. 11. – С. 117-126.
7. Долганина, Н.Ю. Проектирование новых конструкций тканевых бронепанелей с использованием суперкомпьютерных вычислений / Н.Ю. Долганина, С.Б. Сапожников // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Математическое моделирование и программирование". – 2011. – Вып. 10. – № 37(254). – С. 71–81.
8. Hallquist, J.O. LS-DYNA Keyword User's Manual v.970 / J.O. Hallquist – Livermore Software Technology Corporation, 2003. – 1564 p.

9. Martinez, M.A. Friction and wear behaviour of Kevlar fabrics / M.A. Martinez, C. Navarro, R. Cortes, J. Rodriguez, V. Sanchez-Galvez // Journal of materials science. – 1993. – Vol. 28. – P. 1305–1311.
10. Суперкомпьютер «СКИФ–Аврора ЮУрГУ»: URL: http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_avrora/ (дата обращения: 01.09.2012).
11. Исследование производительности суперкомпьютеров семейства "СКИФ Аврора" на промышленных задачах/ А.А. Московский, М.П. Перминов, Л.Б. Соколинский и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Математическое моделирование и программирование". – Вып. 6. – 2010. – № 35(211). – С. 66–78.

Наталья Юрьевна Долганина, кандидат технических наук, доцент кафедры системного программирования, начальник отдела поддержки и обучения пользователей Лаборатории суперкомпьютерного моделирования, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск, Российская Федерация), dnu001@mail.ru.

Investigation of Impact Interaction of the Indenter With Fabric Armor Plate Which Located on the Clay Basis

N. Yu. Dolganina, South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

Supercomputer simulation of the dynamic interaction between the indenter and textile armor plate is considered. Armor plate made of 1 - 5 layers of fabric 10x10 cm and located on the clay bottom. The fibers in textiles have the ability to break down. Mechanical characteristics of the backing material (technical clay) are defined. Comparison of the calculated and experimental results conducted.

Keywords: supercomputer simulation, FEA model, impact, backing material, textile armor plate.

References

1. GOST R 50744 – 95. Broneodezhda. Klassifikatsiya i obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya [Armor Clothes. Classification and General Technical Requirements]. Prin. Postanovleniyem Gosstandarta Rossii ot 27.02.95 № 82. Vved. s izm. № 1, 2. Utverzhen v sent. 1998 g., maye 2002. Moscow: IPK izd-vo standartov, 2003. 8 p.
2. National Institute of Technology Standard, NIJ Standard 0101.06 Ballistic Resistance of Body Armor. July, 2008.
3. Bova V.G. Kontseptsiya postroyeniya myagkogo bronezhileta dlya maksimalnoy realizatsii svoystv aramidnykh nitay [The Concept of Building a Soft Body Armor to Maximize the Properties of Aramid Fibers] Rabochaya odezhda i sredstva individualnoy zashchity [Clothing and personal protective equipment]. 2001. No. 2(10). P. 11–15.
4. Nilakantan G., Keefe M., Wetzell E.D., Bogetti T.A., Adkinson R., Gillespie J.W. Using LS-DYNA[®] to Computationally Assess the V₀-V₁₀₀ Impact Response of Flexible Fabrics Through Probabilistic Methods // 11th International LS-DYNA[®] Users Conference: Proceedings of the International Users Conference (06-08 June 2010, Detroit). 2010. P. 5-1 – 5-12.

5. Dolganina N.Yu. Otsenka ballisticheskogo predela i progiba mnogosloynnykh tkanevykh plastin pri udare indentorom [Evaluation of Ballistic Limit and Multilayer Fabric Plate Deflection Under Indenter Impact] Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Mashinostroyeniye" [Bulletin of South Ural State University. Series: Mechanical Engineering]. 2010. No. 10. P. 17-23.
6. Dolganina N.Yu., Sapozhnikov S.B., Maricheva A.A. Modelirovaniye udarnykh protsessov v tkanevykh bronezhiletakh i tele cheloveka na vychislitelnom klastere "SKIF Ural" [Modeling of Impact Processes in a Textile Armor and in a Human Body on a SKIF Ural Computational Cluster] Vychislitelnyye metody i programmirovaniye: Novyye vychislitelnyye tekhnologii [Numerical Methods and Programming: New Computing Technologies] 2010. Vol. 11. P. 117-126.
7. Dolganina N.Yu., Sapozhnikov S.B. Proyektirovaniye novykh konstruksiy tkanevykh bronepaneley s ispolzovaniyem superkompyuternykh vychisleniy [Design of new Constructions of Textile Armor Panel Using Supercomputing] Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Matematicheskoye modelirovaniye i programmirovaniye" [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming & Computer Software]. 2011. No. 37(254). Vol. 10. P. 71-81.
8. Hallquist J.O. LS-DYNA Keyword User's Manual v.970 / Livermore Software Technology Corporation, 2003. 1564 p.
9. Martinez M.A., Navarro C., Cortes R., Rodriguez J., Sanchez-Galvez V. Friction and Wear Behaviour of Kevlar Fabrics // Journal of materials science. 1993. Vol. 28. P. 1305 – 1311.
10. Supercomputer «SKIF-Avrora YuUrGU»: URL: http://supercomputer.susu.ac.ru/computers/skif_avrora/ (accessed: 01.09.2012).
11. Moskovskiy A.A., Perminov M.P., Sokolinskiy L.B., Cherepennikov V.V., Shamakina A.V. Issledovaniye proizvoditelnosti superkompyuterov semeystva "SKIF Avrora" na industrialnykh zadachakh [Performance Analysis of the Family of Supercomputers "SKIF Aurora" on Industrial Problems] Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Matematicheskoye modelirovaniye i programmirovaniye" [Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematical Modeling, Programming & Computer Software]. 2010. No. 35(211). P. 66–78.

Поступила в редакцию 5 ноября 2012 г.