

УДК: 623.445.1

DOI: 10.53816/23061456\_2021\_9-10\_140

**УЛУЧШЕНИЕ СВОЙСТВ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ  
ЗА СЧЕТ ОБРАБОТКИ ХИМИЧЕСКИМИ СОСТАВАМИ**

**IMPROVEMENT OF A BULBY RESISTANT MATERIAL FROM BALLISTIC  
FABRIC AT THE ACCOUNT OF PROCESSING BY CHEMICAL COMPOSITIONS**

*Канд. тех. наук Н.М. Сильников, Д.Д. Барков, Н.Н. Ревин, Ю.Е. Нечаева*

*Ph.D. N.M. Silnikov, D.D. Barkov, N.N. Revin, Yu.E. Nechaeva*

*АО «НПО Спецматериалов»*

В статье описан эксперимент по обработке баллистических тканей химическими составами на основе высокомолекулярного органического вещества и катализаторами различной концентрации. Обработка баллистических тканей химическими растворами имела целью увеличить фрикционное взаимодействие нитей тканей за счет возникновения дополнительных связей между элементарными нитями, а также между нитями основы и утка. Дополнительные связи позволяют перераспределять энергию поражающего элемента (пули, осколка) на весь объем материала и тем самым повышать защитные свойства материала без утяжеления бронедежды. В статье описана суть эксперимента, показан порядок его проведения, включая испытания образцов тканей и обработку численных результатов.

Экспериментальным образом подобраны концентрации растворов, дающие максимальное увеличение значений разрывной нагрузки баллистических тканей.

**Ключевые слова:** пулестойкий материал, средство индивидуальной бронезащиты, обработка баллистической ткани.

The article discusses methods for impregnation ballistic fabric due to the additional processing of fabric threads with various compositions, including the high molecular weight organic compound and chemical reaction catalyst. The treatment of ballistic fabrics with chemical solutions was aimed at increasing the frictional interaction of the threads of the fabrics due to the appearance of additional bonds between the elementary threads, as well as between the warp and weft threads. Additional connections make it possible to redistribute the energy of the striking element (bullet, fragment) to the entire volume of the material and thereby increase the protective properties of the material without weighing down the armor. The article describes the essence of the experiment, shows the procedure for its implementation, including testing tissue samples and processing numerical results. Concentrations of chemical compounds were selected experimentally, which give the maximum increase in the breaking load of ballistic tissues.

**Keywords:** bulletproof material, means of individual armor protection, treatment of ballistic tissue.

Выполнение служебного долга военнослужащими, сотрудниками органов внутренних дел, внутренних войск связано с реальной опасностью для их жизни и здоровья. Защитить человека от поражающего действия холодного оружия, осколков, и пуль призваны средства индивидуальной бронезащиты (СИБ): бронезилеты, защитная одежда, бронешлемы [1, 2].

В качестве элементов защитных структур, поглощающих и рассеивающих энергию средств поражения и тем самым реализующих функцию защиты, в настоящее время применяются металлические, керамические, органопластиковые (композитные), комбинированные защитные элементы. Кроме того, широко применяются пакеты из баллистических тканей, на основе волокон СВМ, Kevlar™, Twaron™ и других [2, 3].

Данные ткани состоят из арамидных нитей, которые обладают наибольшими значениями удельного модуля упругости среди известных конструкционных материалов [3]. Торможение пули происходит вследствие динамических процессов (растяжение нитей и трение между нитями внутри каждого слоя ткани) и процессов фрикционного взаимодействия (вытягивание нитей) внутри каждого слоя ткани [4]. За счет этого они эффективно распределяют кинетическую энергию пули и демонстрируют свои преимущества.

В противовес развитию средств поражения и огнестрельного оружия необходимо постоянное совершенствование средств индивидуальной бронезащиты. Вместе с тем, СИБ должны соответствовать целому ряду требований, как по классу защитной структуры, так и по эксплуатационным свойствам и эргономическим характеристикам.

Обладая высокими баллистическими характеристиками, тканевые пакеты должны содержать большое число слоев, чтобы обеспечить высокий класс защиты [5]. Это заметно ограничивает подвижность человека в бронезилете или защитной одежде, изготовленных с использованием многослойных тканевых пакетов, а также увеличивает массу изделия и усложняет технологию изготовления отдельных элементов и изделия в целом.

Поэтому при разработке таких бронепанелей актуальной является задача минимизации их массы при сохранении уровня защиты. Увеличить фрикционное взаимодействие нитей и за счет этого снизить прогиб тыльной стороны бро-

непакета при локальном ударе, лишь минимально увеличив массу изделия, позволяет обработка тканей различными составами.

Однако, существующие на сегодняшний день составы могут быть лишь ограниченно использованы при изготовлении СИБ т.к. не обеспечивают достижение требуемых служебных параметров по сочетанию баллистической стойкости и гибкости материала. Пропитка anomalно вязкими жидкостями многократно увеличивает поверхностную плотность тканей, затрудняет вытягивание нитей и приводит к их раннему обрыву [7]. Недостаток использования смеси фторакрилатных полимеров состоит в малой гибкости обработанного защитного материала. Обработка другими веществами, например перфторпроизводными углеводов, придает материалу водоотталкивающие свойства, но не связывает между собой элементарные нити, а также нити основы и утка, поэтому не позволяет перераспределить энергию поражающего элемента на весь объем одного слоя материала [8].

В целях получения пулестойкого материала из слоев баллистической ткани, обладающего повышенными: гибкостью, стойкостью к истиранию и высокими баллистическими свойствами были проведены специальные исследования, описанные в [9]. Данный способ основан на обработке баллистической ткани высокомолекулярным органическим соединением.

Насыщение баллистической ткани жидкими составами вызывает сближение молекул, скрепленных друг с другом, что приводит к образованию химических связей с полимерными цепями волокна баллистической ткани. При этом незначительное склеивание волокон баллистической ткани позволяет сохранить ее гибкость [8].

Цель данной работы — экспериментально провести ряд опытов по обработке баллистических тканей раствором высокомолекулярного органического соединения с последующей обработкой раствором на основе серной кислоты, подбирая его концентрацию таким образом, чтобы добиться максимального увеличения значней разрывной нагрузки для образцов баллистической ткани. Эта информация станет основой для принятия решения о проведении пулевых испытаний баллистического пакета из слоев арамидной ткани, обработанных подобранным на первом этапе раствором.

Конечная цель — получение способа повышения баллистических характеристик тканевых защитных композиций без увеличения массы изделий.

Баллистическая арамидная ткань состоит из нитей, которые изготовлены из элементарных волокон, связанных между собой силами трения и водородных связей. При попадании поражающего элемента (пуля, осколок) в ткань каждое элементарное волокно воспринимает нагрузку самостоятельно, что приводит к неравномерному натяжению элементарных волокон и как следствие к их разрыву. Силы водородных связей имеют низкую энергию связи (12,5...20,0 кДж/моль) и не способны распределить нагрузку равномерно на все элементарные волокна в одной нити, а тем более между нитями основы и утка [8]. Вид водородных связей в элементарном волокне баллистической арамидной ткани представлен на рис. 1.

Применяемый в работе метод основан на шлихтовании нитей ткани путем погружения

ткани в раствор высокомолекулярного органического соединения нужной концентрации, выдержку в нем, сушку до испарения растворителя, обработку катализатором — раствором на основе серной кислоты, последующую отмывку от катализатора и сушку до воздушно-сухого состояния.

При обработке ткани первым раствором заполняется пространство между элементарными волокнами, а также между нитями основы и утка. При последующей обработке вторым раствором — катализатором возникают ковалентные связи не только между элементарными волокнами, но и между нитями основы и утка, что придает ткани способность равномерно распределять нагрузку от воздействия поражающего элемента. Помимо ковалентных связей, возникающих в процессе химической реакции, водородные связи между нитями арамидной ткани и органическим соединением первого раствора также сохраняются (рис. 2).

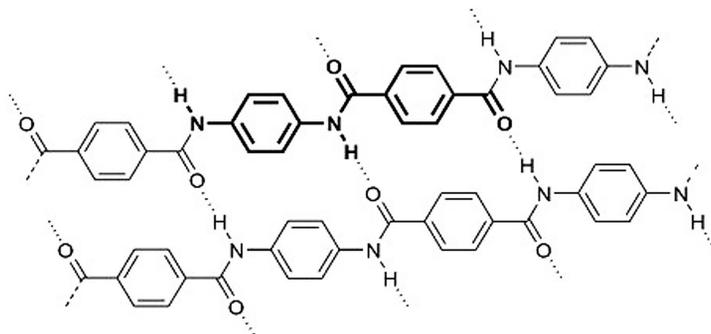


Рис. 1. Вид водородных связей в элементарном волокне баллистической арамидной ткани

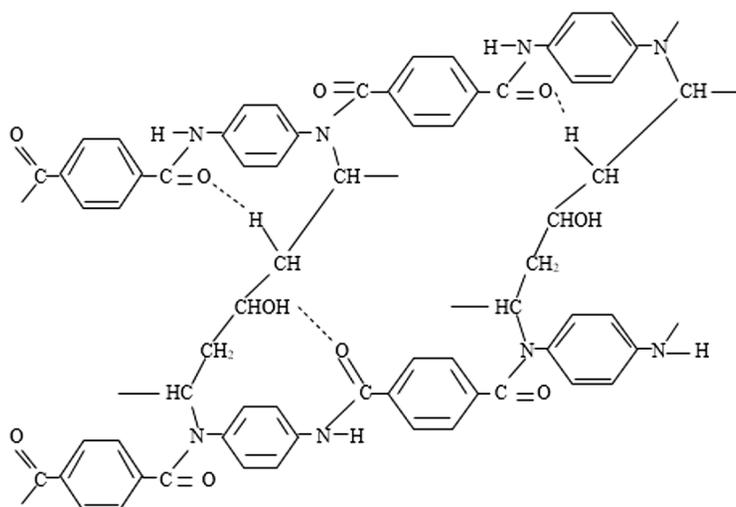


Рис. 2. Вид ковалентных связей в баллистической ткани

Первый раствор готовится путем введения высокомолекулярного органического соединения в нагретую до температуры 90–100 °С дистиллированную воду. Время выдержки ткани в водном растворе составляет около 2 часов. Затем происходит сушка образцов при температуре 105 °С в течение 2 часов. После этого образцы погружаются в раствор катализатора. Время обработки ткани вторым раствором составляет около 1 часа. Затем ткань отмывается до значений pH, близких к нейтральному и сушится при температуре 105 °С в течение 2 часов. Затем образцы подвергаются испытанию на определение разрывной нагрузки.

От концентрации второго раствора в большей степени зависят показатели разрывной нагрузки образцов. Поэтому, в целях подбора его концентрации, дающей наибольшее увеличение значений разрывной нагрузки, производятся опыты с 10 %-м, 20 %-м, 30 %-м и 40 %-м растворами — по 10 образцов на каждый раствор для получения ряда значений и расчета среднего.

Кроме того, испытания на определение разрывной нагрузки проходят 10, так называемых «нулевых» образцов, без какой-либо обработки. Они используются для сравнения и расчета процента увеличения разрывной нагрузки обработанных образцов по отношению к необработанным.

Арамидные ткани производят используя полотняное, атласное, саржевое, вафельное виды переплетения нитей. Арамидные ткани также имеют отличия по поверхностной и линейной плотности, числу нитей на 10 см. Для экспериментального исследования выбраны три вида арамидных тканей:

- ткань арамидная Twaron «Тип 1»;
- ткань арамидная Twaron «Тип 2»;
- ткань арамидная Twaron «Тип 3»;

Характеристики выбранных тканей представлены в табл. 1.

Внешний вид исходных тканей представлен на рис. 3.

Из каждой обозначенной ткани вырезаны и подготовлены образцы:

- 10 «нулевых» образцов — образцы, не подвергаемые обработке и используемые для сравнения;
- 10 образцов для обработки первым раствором без последующей обработки вторым раствором;
- 10 образцов для обработки первым раствором с последующей обработкой вторым раствором 10 %-ой концентрации;
- 10 образцов для обработки первым раствором с последующей обработкой вторым раствором 20 %-ой концентрации;

Таблица 1

Характеристики тканей, использованных для эксперимента

Наименование	Ширина, см	Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	Линейная плотность нити, dtex	Переплетение	Число нитей на 10 см	
					основа	уток
Ткань арамидная Twaron «Тип 1»	160	278	1100	полотняное	122	120
Ткань арамидная Twaron «Тип 2»	160	221	550	полотняное	183	186
Ткань арамидная Twaron «Тип 3»	120	285	1100	полотняное	123	129



Рис. 3. Фотографии баллистических тканей до обработки. Слева направо: ткань арамидная Twaron «Тип 1»; ткань арамидная Twaron «Тип 2»; ткань арамидная Twaron «Тип 3»

– 10 образцов для обработки первым раствором с последующей обработкой вторым раствором 30 %-ой концентрации;

– 10 образцов для обработки первым раствором с последующей обработкой вторым раствором 40 %-ой концентрации.

Образцы арамидных тканей Twaron «Тип 1» и «Тип 3» имели 10 нитей основы и составляли каждый 35 см в длину. Образцы ткани «Тип 2» имели 15 нитей основы и составляли 35 см в длину. Выбор размеров образцов обусловлен возможностями и техническими характеристиками используемой разрывной машины, а также особенностями самих тканей: оказалось невозможным и нецелесообразным испытывать образцы, имеющие 10 нитей основы, т.к. ширина образцов получается меньшей по сравнению с двумя другими тканями, а значения разрывной нагрузки не точными из-за работы в нижнем диапазоне нагрузок.

Проверка pH производилась с помощью лакмусовых бумажек. Измерение плотности растворов осуществлялось с помощью ареометра. В качестве вспомогательного оборудования использо-

вались: электрический аквадистиллятор ПЭ-2205 и магнитная мешалка ES-6120 с подогревом.

Каждый образец подвергался соответствующей обработке, а затем испытывался на определение разрывной нагрузки на испытательной машине РТ-250М.

Эксперимент проведен с использованием лабораторного оснащения и оборудования Завода специальных материалов АО «НПО Спецматериалов».

Описанный метод был реализован для трех выбранных тканей. Результаты представлены в табл. 2–4. В колонтитулах таблиц по горизонтали представлены исследуемые пропитки; по вертикали — испытываемые образцы с номерами по порядку. На пересечении соответствующей строки и столбца — значение разрывной нагрузки образца. Для каждого вида пропитки рассчитано среднее значение разрывной нагрузки, а затем процент увеличения нагрузки по отношению к образцу «0», то есть по отношению к необработанным образцам.

Наглядно продемонстрировать результаты можно с помощью сводного графика (рис. 4).

Таблица 2

Результаты испытаний ткани арамидной Twaron «Тип 1»

Ткань арамидная Twaron «Тип 1» (образцы 10 нитей основы, длиной 35 см)						
	образец «0» (без обработки)	образец 1; первый раствор	образец 2; первый раствор, второй раствор 10 %-й конц.	образец 3; первый раствор, второй раствор 20 %-й конц.	образец 4; первый раствор, второй раствор 30 %-й конц.	образец 5; первый раствор, второй раствор 40 %-й конц.
1	1,22*	1,40	1,62	1,51	1,24	0,99
2	1,05	1,24	1,52	1,52	1,30	1,21
3	1,15	1,19	1,56	1,62	1,35	1,08
4	1,32	1,17	1,72	1,56	1,28	1,11
5	1,38	1,44	1,64	1,62	1,33	1,16
6	1,10	1,37	1,35	1,63	1,34	1,07
7	1,22	1,29	1,65	1,57	1,15	1,30
8	1,16	1,36	1,50	1,45	1,26	1,15
9	–	1,37	1,59	1,54	1,32	0,83
10	–	–	1,46	–	1,25	1,13
Ср. нагрузка	1,20	1,31	1,56	1,55	1,28	1,10
Среднеквадратичное отклонение	0,11	0,10	0,11	0,06	0,06	0,13
% увеличения нагрузки по отношению к образцу «0»	–	9,49	30,19	29,80	6,93	–8,02

Примечание: \* показатели разрывной нагрузки — в кН

## Результаты испытаний ткани арамидной Twaron «Тип 2»

Ткань арамидная Twaron «Тип 2» (образцы 15 нитей основы, длиной 35 см)						
	образец «0» (без обработки)	образец 1; первый раствор	образец 2; первый раствор, второй раствор 10 %-й конц.	образец 3; первый раствор, второй раствор 20 %-й конц.	образец 4; первый раствор, второй раствор 30 %-й конц.	образец 5; первый раствор, второй раствор 40 %-й конц.
1	1,00*	1,18	1,13	1,07	1,02	0,90
2	0,96	1,16	1,14	1,15	0,86	1,31
3	0,96	1,13	1,08	1,07	0,97	0,89
4	0,88	1,15	1,06	1,00	1,28	0,93
5	0,83	1,08	1,08	1,04	1,01	0,88
6	0,94	1,09	0,73	0,92	0,87	0,85
7	0,89	1,01	0,96	0,99	0,92	0,98
8	0,97	0,99	1,01	0,92	0,94	0,89
9	0,91	0,94	1,04	1,08	0,92	0,81
10	0,98	1,29	0,81	1,05	0,78	1,24
Ср. нагрузка	0,90	1,10	1,00	1,03	0,95	0,97
Среднеквадратичное отклонение	0,05	0,10	0,14	0,07	0,14	0,17
% увеличения нагрузки по отношению к образцу «0»	–	21,58	11,01	13,45	5,64	6,92

Примечание: \* показатели разрывной нагрузки — в кН

## Результаты испытаний ткани арамидной Twaron «Тип 3»

Ткань арамидная Twaron «Тип 3» (образцы 10 нитей основы, длиной 35 см)						
	образец «0» (без обработки)	образец 1; первый раствор	образец 2; первый раствор, второй раствор 10 %-й конц.	образец 3; первый раствор, второй раствор 20 %-й конц.	образец 4; первый раствор, второй раствор 30 %-й конц.	образец 5; первый раствор, второй раствор 40 %-й конц.
1	1,53*	1,34	1,71	1,74	1,28	1,24
2	1,46	1,54	1,71	1,59	1,22	1,19
3	1,13	1,54	1,71	1,69	1,17	1,25
4	1,24	1,49	1,68	1,55	1,29	1,21
5	1,37	1,56	1,80	1,71	1,07	1,15
6	1,29	1,53	1,73	1,51	1,33	1,19
7	1,29	1,53	1,72	1,78	1,14	1,11
8	1,28	1,56	1,75	1,41	1,07	1,31
9	1,30	1,62	1,83	1,52	1,22	1,29
10	1,34	1,59	1,64	1,65	1,15	1,16
Ср. нагрузка	1,32	1,53	1,73	1,61	1,19	1,21
Среднеквадратичное отклонение	0,11	0,08	0,05	0,12	0,09	0,06
% увеличения нагрузки по отношению к образцу «0»	–	15,58	30,52	21,97	–9,83	–8,70

Примечание: \* показатели разрывной нагрузки — в кН

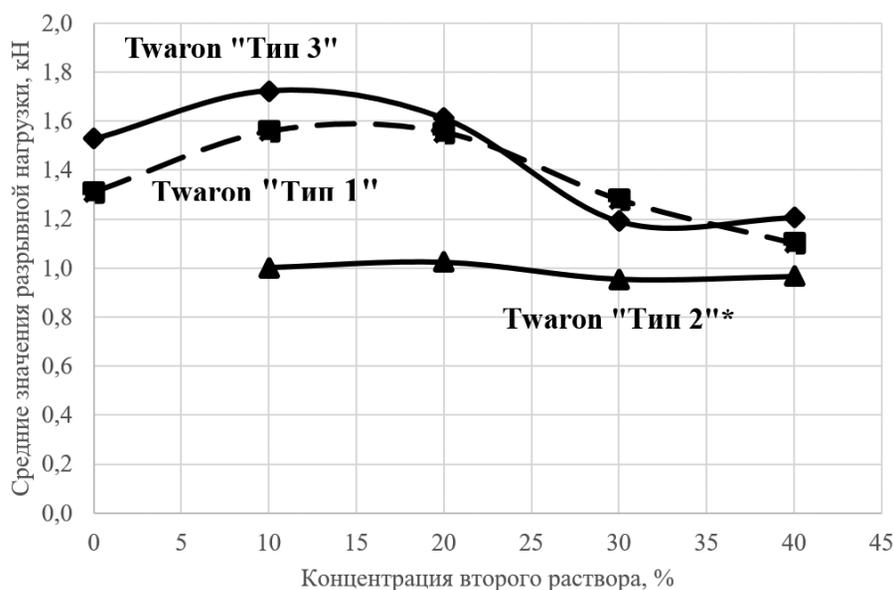


Рис. 4. Графики зависимостей средних значений разрывной нагрузки образцов ткани каждого типа от концентрации второго раствора, применяемого в качестве катализатора.

\*Значение средней разрывной нагрузки образцов ткани второго типа, обработанных только первым раствором, не учитывалось при построении графика по результатам цензурирования выборки

Из трех рассматриваемых арамидных тканей Twaron «Тип 1» и Twaron «Тип 3» при изменении концентрации второго раствора, применяемого в качестве катализатора после обработки раствором высокомолекулярного органического соединения, ведут себя примерно одинаково (табл. 5). Наибольшее значение разрывной нагрузки достигнуто после обработки образцов 10 %-м раствором катализатора.

Для ткани Twaron «Тип 2» эта зависимость имеет иной вид, что можно объяснить особенностями самой ткани.

В связи со сложностью и многофакторностью процессов, возникающих при торможении пули в структуре защитного элемента [10, 11], в вопросе разработки новых видов защитных материалов или их модификации недостаточно только лабораторных испытаний образцов тканей, обработанных раствором и катализатором. Поэтому следующий шаг в данной работе — проведение натурных пулевых испытаний бронепакетов, составленных из слоев ткани, обработанных по способу, дающему наибольшее увеличение значения разрывной нагрузки по результатам описанных выше опытов. Пулевые испытания позволят определить количество разрушенных слоев ткани, величину прогиба тыльной стороны бронепакета [12] и сделать вывод

о возможности/невозможности уменьшения числа слоев в пакете.

После получения результатов первых пулевых испытаний, в случае необходимости, можно будет рассмотреть возможность создания баллистического пакета, в котором будут обработаны не все, а лишь некоторые слои. Связано это с тем, что в наружных слоях тканевого пакета, контактирующих с высокоскоростной пулей, превалирует динамическая фаза работы тканей, а в тыльных слоях — фрикционная, низкоскоростная [13]. Такие особенности работы баллистических пакетов заставляют по-разному рассматривать взаимодействие нитей в тканевых слоях.

Из других возможных перспектив развития — проверка тканей с разным типом переплетения нитей. Все так же из-за особенностей работы наружных и тыльных слоев баллистического пакета, его можно собирать из слоев с различным типом переплетения нитей, некоторые из которых будут обработаны составом по описанному методу.

Таким образом, проведен и описан эксперимент по обработке баллистических тканей специальными составами, увеличивающими взаимодействие нитей. Полученные в работе выводы будут использованы для дальнейших пулевых испытаний бронепакетов из обработанных

Сводная таблица по трём видам тканей со значениями разрывных нагрузок

Средние значения разрывных нагрузок (сводная таблица по трём видам тканей), кН						
	образец «0» (без обработки)	образец 1; первый раствор	образец 2; первый раствор, второй раствор 10 %-й конц.	образец 3; первый раствор, второй раствор 20 %-й конц.	образец 4; первый раствор, второй раствор 30 %-й конц.	образец 5; первый раствор, второй раствор 40 %-й конц.
Ткань арамидная Twaron «Тип 1»	1,20	1,31	1,56	1,55	1,28	1,10
Ткань арамидная Twaron «Тип 2»	0,90	1,10	1,00	1,03	0,95	0,97
Ткань арамидная Twaron «Тип 3»	1,32	1,53	1,73	1,61	1,19	1,21

тканей. Результаты могут иметь перспективы реального применения в качестве способа изготовления защитных композиций, обеспечивающих требуемый класс защиты без утяжеления бронеодежды.

### Литература

1. ГОСТ 34286-2017 Бронеодежда. Классификация и общие технические требования. — М.: Стандартинформ. 2018. 11 с.

2. Сильников М.В., Химичев В.А. Средства индивидуальной бронезащиты: Учеб. пособие. СПб: Фонд «Университет». 2000. 478 с.

3. Игнатова А.В., Долганина Н.Ю., Сапожников С.Б., Шаблей А.А. Поверхностная обработка арамидной ткани и ее влияние на механику фрикционного взаимодействия нитей // Вестник ПНИПУ. Механика. 2017. № 4. С. 121–137.

4. Дмитриенко Ю.И., Беленовская Ю.В., Анискович В.А. Численное моделирование ударно-волнового деформирования гибких броневых композитных материалов // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». 10.7463/1213.0665297. 2013.

5. Ноздрачев А.В., Сальников В.П., Сильников М.В., Химичев В.А. Экипировка: Учеб. пособие / Под общей редакцией В.П. Сальникова и М.В. Сильникова / Санкт-Петербургский университет МВД России; Академия права, эко-

номики и безопасности жизнедеятельности. — СПб: Фонд «Университет». 2001. 272 с.

6. Швайков Д.К., Чивилев В.В., Прошкин В.В. Сравнительные баллистические характеристики защитных пакетов из некоторых видов высокопрочных химических волокон // Вопросы оборонной техники. Серия 15. 1996. № 3 (115)–4 (116). С. 10–12.

7. Долганина Н.Ю., Игнатова А.В. Разработка компьютерных моделей баллистических тканей с поверхностной обработкой // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6. № 4. С. 91–100.

8. Сильников М.В., Сильников Н.М., Спивак А.И., Барков Д.Д. Разработка пулестойкого материала из баллистической ткани за счет многоступенчатой обработки химическими составами // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2020. № 3–4 (141–142). С. 135–139.

9. Способ получения баллистической ткани для изготовления баллистического материала и пулестойкий материал: пат. 2629744 Рос. Федерация: МПК F41H1/02, D06M 3/148/ М.В. Сильников и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «НПО СМ». — 2016123914; заявл. 15.06.16; опубл. 31.08.17. Бюл. № 25.

10. Григорян В.А., Маринин В.М., Хромушин В.А. Два способа определения баллистического предела стойкости средств индивидуальной защиты. Techniczne Wyroby

Wlokiennicze. — Poland, Lodz. 2004. Volume XII. № 1–2. P. 27–31.

11. Григорян В.А., Маринин В.М., Хромушин В.А. Расчетная оценка противоосколочной стойкости тканевых защитных структур на основе характеристик энергоемкости. — М.: АРМОКОМ. 2005. С. 14–15.

12. ГОСТ Р 55623-2013 Бронеодежда. Методы испытаний. — М.: Стандартиформ. 2014. 10 с.

13. Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Мulyar С.Г. Анализ эффективности различных средств индивидуальной бронезащиты // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». 77-30569/342101. 2012. № 3.

### References

1. GOST 34286-2017 Armor. Classification and general technical requirements. — М.: Standartinform. 2018. 11 p.

2. Silnikov M.V., Khimichev V.A. Individual body armor. — St. Petersburg. Fund «Universitet» Publ. 2000. 478 p.

3. Ignatova A.V., Dolganina N.Yu., Sapozhnikov S.B., Shabley A.A. Aramid fabric surface treatment and its impact on the mechanics of yarn's frictional interaction. PNRPU Mechanics Bulletin. 2017. № 4. P. 121–137. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.09.

4. Dmitrienko Yu.I., Belenovskaya Yu.V., Aniskovich V.A. Numerical modeling of shock-wave deformation of flexible armor composite materials / Electronic scientific and technical publication «Science and Education». 10.7463/1213.0665297. 2013.

5. Nozdrachev A.V., Salnikov V.P., Silnikov M.V., Khimichev V.A. Equipment: Under the general editorship of V.P. Salnikov and M.V. Silnikov / St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia; Academy of Law, Economics and Life Safety. — SPb: Fund «University». 2001. 272 p.

6. Shvaikov D.K., Chivilev V.V., Proshkin V.V. Comparative ballistic characteristics of protective bags made of some types of high-strength chemical fibers // Military Enginry. Issue 15. 1996. № 3 (115)–4 (116). P. 10–12.

7. Dolganina N.Yu., Ignatova A.V. The development of computer models of ballistic fabric with surface treatment // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering. 2017. Vol. 6. № 4. P. 91–100.

8. Silnikov M.V., Silnikov N.M., Spivak A.I., Barkov D.D. Development of a bullet-resistant material from ballistic fabric due to multi-stage processing with chemical compounds // Military Enginry. Issue 16. Counter-terrorism technical devices. 2020. № 3–4 (141–142). P. 135–139.

9. Method of producing ballistic fabric for manufacturing ballistic material and bulletproof material: pat. 2629744 Ros. Federation: IPC F41H1/02, D06M 3/148 / M.V. Silnikov and others; the applicant and the patent owner of Special Materials Corporation. 2016123914; claimed. 15.06.16; publ. 31.08.17. Bul. № 25.

10. Grigoryan V.A., Marinin V.M., Khromushin V.A. Two ways to determine the ballistic resistance limit of personal protective equipment. Techniczne Wyroby Wlokiennicze. — Poland, Lodz. 2004. Volume XII. № 1–2. P. 27–31.

11. Grigoryan V.A., Marinin V.M., Khromushin V.A. Calculated assessment of the splinter resistance of tissue protective structures based on the characteristics of energy intensity. — М.: АРМОКОМ. 2005. P. 14–15.

12. ГОСТ R 55623-2013 Armor. Test methods. — М.: Standartinform. 2014. 10 p.

13. Galinovsky A.L., Kolpakov V.I., Mulyar S.G. Analysis of the effectiveness of various means of personal body armor / Electronic scientific and technical publication «Science and Education». 77-30569 / 342101. 2012. № 3.