

## ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ТКАНЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ\*

Онучин Е.С., Фельдштейн В.А., Товарнова Н.А., Васильченко Л.Б., Орлов Д.А.

*Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»), г. Королев, Россия*

### АННОТАЦИЯ

Обеспечение функционирования космических орбитальных станций предполагает принятие конструктивных мер по защите от ударов частиц космического мусора и метеороидов. Это достигается путем применения многослойных защитных экранов, в состав которых входят слои на основе тканевых материалов. Расчет и проектирование экранов требует характеристик, определяющих энергозатраты на разрушение ткани (энергоемкость) при ударе.

В работе описана методика и результаты экспериментального определения энергии, поглощаемой в тканевых пакетах экранных защитных конструкций орбитальных пилотируемых станций при действии распределённой импульсной нагрузки, возникающей в результате соударения с частицами космического мусора. Энергия, поглощаемая в тканевых пакетах, в эксперименте определяется в результате анализа соударения образца с плоским металлическим ударником, ускоряемым воздушной газовой пушкой. Приведены экспериментальные результаты в области давлений до 1,5 ГПа. С использованием модели ткани как пористого материала получена зависимость поглощаемой тканевым пакетом энергии от давления в диапазоне до 10 ГПа, которая сопоставляется с экспериментальными результатами. Показано, что для сильно пористых материалов зависимость поглощаемой энергии от давления в ударной волне близка к линейной. Получена соответствующая асимптотическая зависимость для сильно пористых материалов при высоких давлениях нагружения.

**Ключевые слова:** космический мусор; высокоскоростное соударение; экранная защитная конструкция; тканевый экран; импульсное воздействие; поглощаемая энергия; разрушение

## FABRIC ENERGY ABSORPTION VOLUME UNDER SHOCK LOADING CONDITIONS

Onuchin E.S., Feldstein V.A., Tovarnova N.A., Vasilchenko L.B., Orlov D.A.

*Central Research Institute for Machine Building JSC, Korolev, Russia*

### ABSTRACT

Space orbital stations operations support consists an adoption of meaningful measures to protect space station against impacts of space debris and meteoroids. This goal can be reached by using multilayered protection shields that are made with the fabric material layers. Shields designing and modeling requires specific characteristics that define energy absorbed volume by the fabric destruction under impact.

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-17027.

The paper describes the methodology and experimental determination method for absorbed energy volume results by using multilayer fabrics of orbital manned stations shielding constructions under distributed impulse loading caused by the space debris impacts. The energy absorbed volume by the multilayer fabrics is obtained from the experiments by analysis of specimen and flat metal projectile impact. Projectile was accelerated by the air gas gun. The obtained experimental determination results of energy absorbed volume in pressure range up to 1,5 GPa are given. Using the model of fabric as a porous material its energy absorption volume dependence in pressure range up to 10 GPa and compared with experimental data. It is shown that for materials with high porosity absorbed energy volume against pressure dependence is close to linear. Corresponding asymptotic dependence for materials with high porosity under the high pressure is obtained.

**Keywords:** space debris; high velocity impact; shielding design; fabric multilayer design; impulse load; absorbed energy; destruction

## ВВЕДЕНИЕ

### Конструкция промежуточного экрана.

Воздействие среды космического мусора создает опасность для космических аппаратов, в особенности для крупномасштабных пилотируемых станций (МКС, МИР) [1]. В настоящее время общепризнано, что обеспечение необходимого уровня безопасности экипажей может быть достигнуто только путем введения в конструкции обитаемых модулей специальных защитных экранов, которые в состоянии парировать удар алюминиевой частицы массой  $\sim 1$  г при скорости  $\sim 10$  км/с. Принцип защиты основан на идее Ф. Уиппла [2], согласно которой экран не задерживает частицу-ударник, что практически невозможно, а разрушаясь, диспергирует ее и превращает в облако осколков. В результате вместо сосредоточенного воздействия компактной частицы защищаемая конструкция воспринимает практически непрерывно распределенную по большой площади нагрузку импульсного характера. Наиболее эффективная схема экранной защитной конструкции (ЭЗК) включает два экрана: лицевой экран из алюминиевого сплава, предназначенный для дробления частицы и второй (промежуточный) экран-пакет из тканевых материалов, дополнительно снижающий нагрузки и парирующий тепловой удар по защищаемой гермооболочке [3]. Внешние слои тканевого пакета выполняются из материалов типа Nextel'a или базальтовых тканей типа ТБ, внутренние – из Kevlar'a или тканей на основе арамидных волокон. При определении нагрузок, воспринимаемых защищаемой конструкцией со стороны продуктов разрушения частицы-ударника и экранов, необходимы характеристики разрушения тканевых материалов при воздействии удара по нормали к плоскости расположения нитей. Такой характеристикой является удельная энергия, поглощаемая тканью при ударе.

### Экспериментальные подходы к определению энергии, поглощаемой тканевыми материалами.

Энергия разрушения материала не относится к числу базовых механических характеристик, входящих в определяющие уравнения, поэтому необходимо уточнять условия, в которых она определяется и используется. Известно, например, что прочность арамидных волокон на растяжение существенно выше прочности на поперечное сдавливание нитей [4]. Очевидно, что и удельная

энергия образования разрыва единичной длины, должна существенно отличаться от энергии дробления единичного объема. Простейшим способом оценки энергии разрушения тканевого пакета, пробиваемого компактным ударником при умеренных скоростях  $\sim 1..2$  км/с, может быть измерение потери скорости ударника. Эксперименты этого типа показывают, что размеры отверстий значительно превышают диаметр ударника, что говорит о наличии, наряду с дроблением, дополнительного разрушения материала за счёт краевой разгрузки волокон, вследствие чего становятся неопределенными разрушаемая и нагружаемая масса материала, к которым нужно относить потерянную энергию. На основе этих экспериментальных данных нельзя также получить оценки давления, реализующегося при нагружении, а прямые измерения контактного давления в этом случае невозможны. Поэтому потери энергии ударника на тканевом пакете в описанной постановке не позволяют определить поглощаемую пакетом энергию как характеристику материала и эксперименты по этой методике могут служить в основном для установления факта пробивания макетов.

В работе [5] описан подход к определению удельной энергии разрушения металлов по удельной энергии плавления и выполнено сравнение с результатами, получаемыми при разрушении пластин, нагружаемых взрывом. Подобные подходы к определению энергии, поглощаемой материалом, также относятся к конкретному режиму нагружения, при котором они определялись, что приводит к значительной неопределенности при их использовании с одной стороны и значительным разбросам характеристик с другой.

Подход, позволяющий получать более полную информацию о режиме нагружения и находить соответствующую зависимость поглощаемой энергии от давления, основан на использовании разрезных стержней Гопкинсона-Кольского. Исследования с использованием этого метода описаны в работах [6-9], где испытаниям подвергаются металлы и армированные композиционные образцы. По измеренным формам импульсов давления на входе и выходе из испытываемых образцов оцениваются потери энергии в них.

## **1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОПОГЛОЩЕНИЯ ТКАНЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЗК ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ**

### **1.1. Схема эксперимента.**

Для определения энергии, поглощаемой тканью, проведены эксперименты, заключающиеся в ударном воздействии плоского ударника на тканевый пакет, установленный на стальной державке; схема эксперимента показана на рис.1. Для ускорения ударника используется установка (воздушная газовая пушка), общий вид которой показан на рис.2.

Установка обеспечивает скорости соударения порядка нескольких сотен метров в секунду. При этом достигаемое давление в образце варьируется путём изменения материала ударника и скорости соударения.

На рис.3 приведена фотография образца, закрепленного на державке (а), и поршня с алюминиевым ударником (б), используемые для проведения экспериментов.

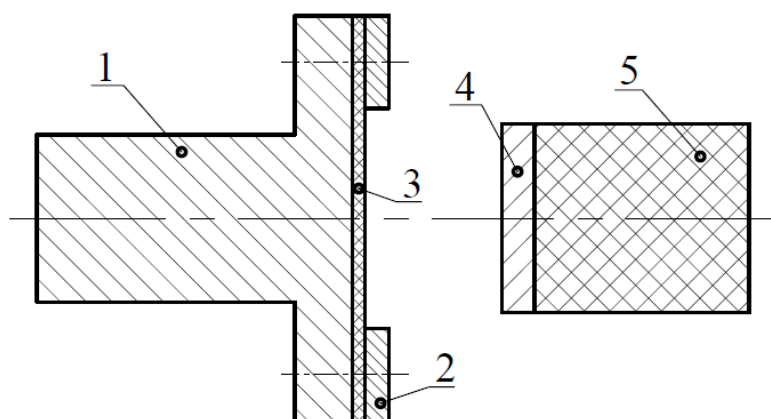


Рис.1. 1 – Державка (Сталь 20), 2 – Прижимная шайба, 3 – Тканевый образец, 4 – Ударник (Al, сталь), 5 – Поршень (Пенопласт).



Рис.2. Воздушная газовая пушка, используемая для метания ударника.

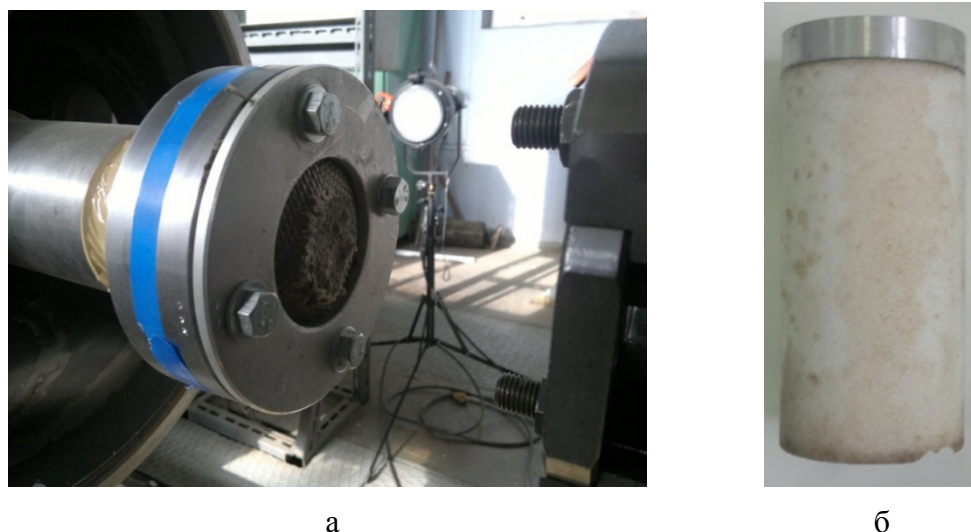


Рис.3. Образец в установке (а), ударник с пенопластовым поршнем, обеспечивающим устойчивость ударника в разгонном стволе установки (б).

Энергия, поглощенная при разрушении тканевого образца, определяется из уравнения закона сохранения энергии

$$T_0 = E_D + E_O + E_P + T_1, \quad (1)$$

где  $T_0$  – начальная кинетическая энергия ударника,  $E_D$  – энергия, поглощённая материалом образца,  $E_O$  – энергия деформирования державки,  $E_P$  – энергия деформирования ударника,  $T_1$  – кинетическая энергия обратного движения ударника.

Для оценки величин  $E_O$  и  $E_P$  измеряется форма импульса давления на поверхности державки под образцом, характеризующая режим нагружения. Для измерения давления используются плёночные пьезодатчики, схема расположения которых показана на рис.4. Для видеорегистрации процесса соударения используется камера Phantom со скоростью съемки 22000 кадров/с при разрешении 640x480 пикселей.

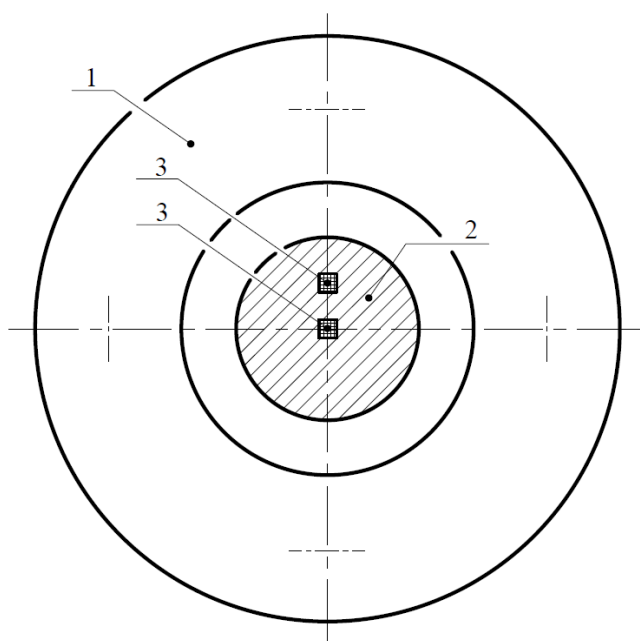


Рис.4. Расположение датчиков давления на державке. 1 – прижимная шайба, 2 – область нагружения образца, 3 – датчик давления.

### 1.2. Результаты экспериментального определения энергии, поглощаемой базальтовой тканью БТР-08.

На основе описанной схемы выполнена серия экспериментов по определению энергопоглощения базальтовой ткани марки БТР-08. В таблице 1 приведены исходные данные экспериментов.

Таблица 1.

Исходные данные экспериментов.

Номер эксп.	Количество слоёв ткани в образце	Материал ударника	Толщина ударника, мм	Масса образца, г	Масса ударника, г
1	6	Al	10	57,31	86,00
2	9	Al	10	75,10	82,00
3	9	Сталь	5	77,03	105,65

4	9	Сталь	3,75	79,52	86,02
5	9	Сталь	5	105,02	104,77
6	3	Сталь	3	25,01	79,47
7	2	Сталь	3	17,55	79,72
8	2	Сталь	2,5	16,12	64,51
9	12	Al	10	104,60	67,00

На рис.5 приведены осциллограммы давления для экспериментов №3, 5, 8. Результаты обработки осциллограмм давления представлены в таблице 2.

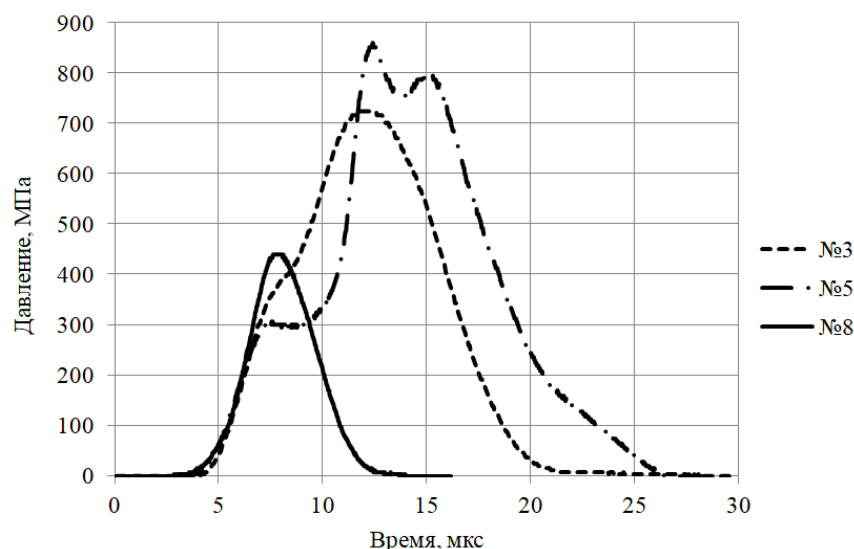


Рис.5. Осциллограммы давления по результатам экспериментов №3, 5, 8.

Таблица 2.

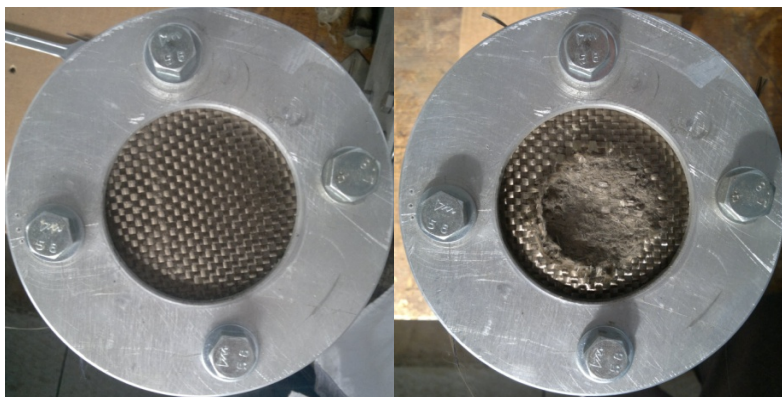
Результаты обработки экспериментальных осциллограмм давления.

Номер эксп.	Скорость удара, м/с	Энергия ударника, Дж	Масса разрушенной части образца, г	Амплитуда давления, МПа	Длительность воздействия, мкс
1	199	1702,84	6,10	-	-
2	212	1842,70	6,11	-	-
3	121	773,44	1,83	697,65	16,8
4	199	1703,14	6,16	1393,82	19,2
5	130	885,33	2,57	805,67	22,6
6	100	397,37	0,91	824,51	10,4
7	78	242,52	0,50	678,06	9,2
8	77	191,24	0,42	454,10	10,8
9	293	2875,94	17,18	-	-

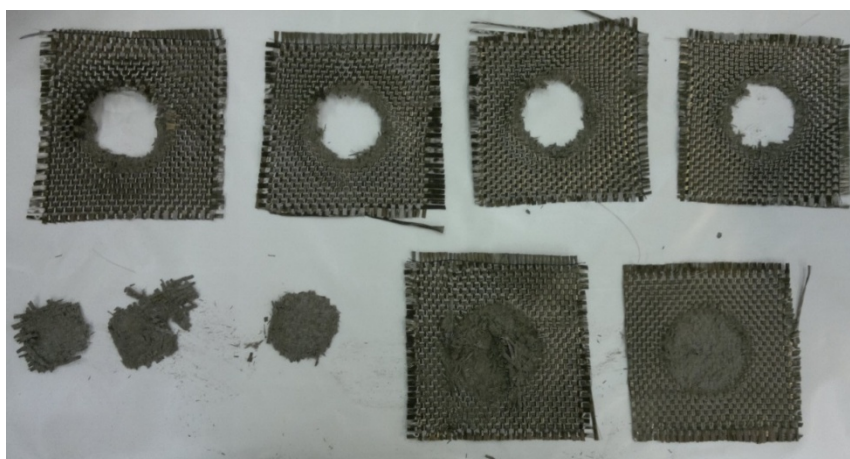
На рис.6а показан образец до и после соударения, на рис.6б – общий вид образцов после удара. На фотографии видны полностью и частично разрушенные слои.

В экспериментах наблюдалось частичное разрушение образцов, начинающееся уже при скоростях соударения  $\sim 80$  м/с (давление  $\sim 400$  МПа). С увеличением скорости удара масса разрушившейся части образца возрастает

от  $\approx 14\%$  до полного разрушения нагружаемой части (эксперимент №9). При этом в выбитом материале присутствуют как диспергированные, так и «вырезанные» куски, которые не могут быть отнесены к раздробленной массе.



а



б

Рис.6. Образец, закрепленный в державке до и после соударения (а), полностью и частично разрушенные слои тканевого пакета (б).

На основе полученных экспериментальных данных оцениваются потери энергии на упругое деформирование ударника и державки и определяется энергия, поглощаемая тканевым пакетом согласно (1). Первая из них оценивается, в предположении, что импульс давления, приложенного к торцу державки, распространяется по ней без искажения со скоростью упругой волны сжатия. Тогда удельная (на единицу поверхности) энергия, поглощенная державкой, может быть оценена как  $E_o = \int_0^{t_\delta} \frac{P(t)^2}{2E} c dt$ , где  $P$  – давление в ударной волне, определяемое по показанию датчиков,  $E$ ,  $c$  – модуль упругости и скорость волны сжатия,  $t_\delta$  – длительность импульса давления.

Нагружаемая площадь державки считается равной площади ударника, что позволяет получить слагаемое  $E_o$  в (1). Энергия деформирования ударника оценивается как энергия упругого сжатия при давлении, соответствующем

пиковому значению на экспериментальной осциллограмме:  $E_p = P_{\max}^2 h / 2E_{y0}$ , где  $h$  – толщина ударника,  $E_{y0}$  – модуль упругости материала ударника.

Кинетической энергией обратного движения ударника после соударения можно пренебречь, что подтверждается малостью скорости отскока, зафиксированной видеозаписью процесса. Раскадровка процесса соударения показана на рис.7.

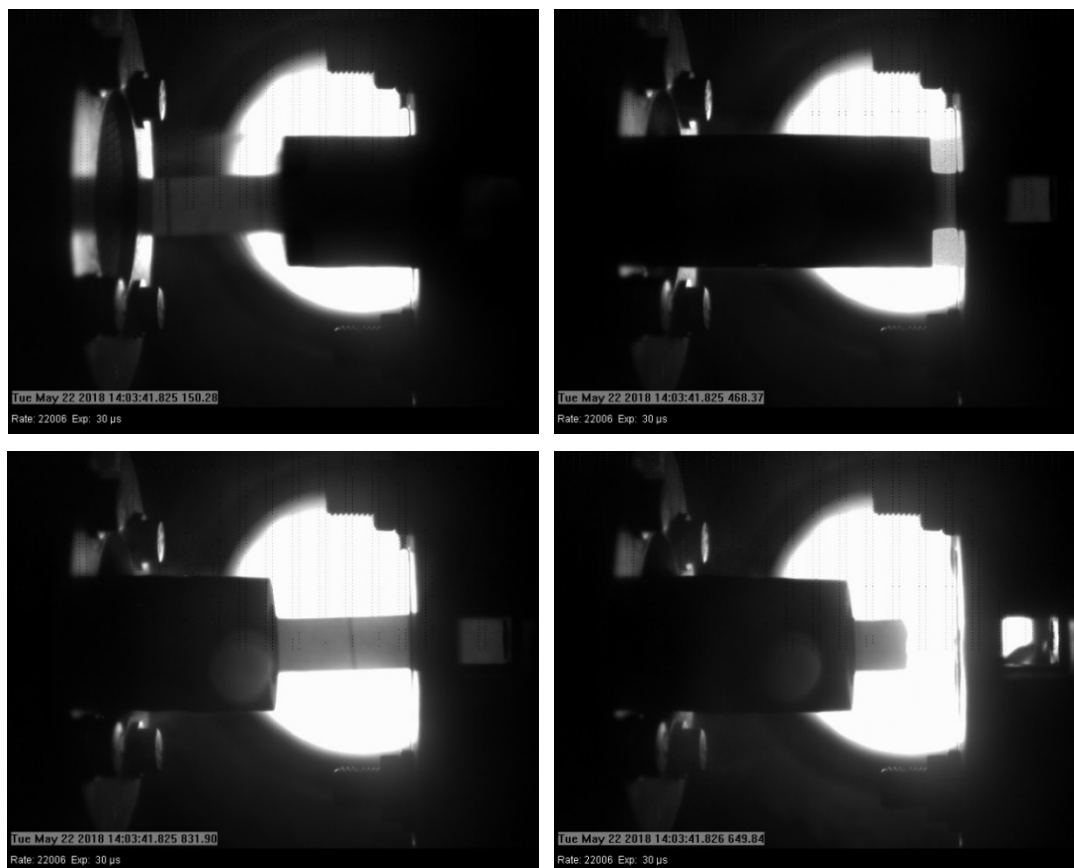


Рис.7. Кадры процесса соударения ударника с образцом (ударник движется справа налево, где расположена державка с образцом (см. рис.3)).

Компоненты уравнения (1), полученные по результатам экспериментов, приведены в таблице 3. Так как в экспериментах ставится цель смоделировать режим нагружения, характерный для тканевого пакета промежуточного экрана в составе ЭЗК, удельная поглощенная энергия определяется как энергия ударника (за вычетом потерь), отнесенная к нагружаемой массе материала.

Таблица 3.

Результаты определения энергии, поглощаемой тканевым пакетом при ударе.

Номер эксп.	Давление, МПа	Скорость удара, м/с	Энергия ударника, Дж	Потери энергии в державке, Дж	Потери энергии в ударнике, Дж	Удельная энергия, поглощенная в образце, Дж/кг
1	-	199	1702,84	-	-	-
2	-	212	1842,70	-	-	-



3	697,65	121	773,44	60,80	11,01	53,36
4	1393,82	199	1703,14	158,99	32,96	115,99
5	805,67	130	885,33	78,23	14,68	60,82
6	824,51	100	397,37	39,11	9,81	75,44
7	678,06	78	242,52	24,02	6,64	68,81
8	454,10	77	191,24	11,41	2,33	61,31
9	-	293	2875,94	-	-	-

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТКАНЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

### 2.1. Свойства тканевых материалов как пористой среды.

Специфика структуры тканевых материалов подсказывает [10], что они в некотором приближении могут рассматриваться, как пористые, для которых устанавливается корреляция с характеристиками исходного монолитного материала [11]. Препятствием может быть только отсутствие у большинства тканей монолитного «аналога». Однако для базальтовых тканей такой исходный материал существует и достаточно хорошо изучен [12,13]. Свойства образцов базальтов могут отличаться ввиду различий химического состава и структурных особенностей, поэтому используются средние значения, вычисленные по имеющимся экспериментальным данным.

В работе [14] приводятся зависимости скорости ударной волны от массовой скорости  $D(U) = a + bU$  для двух типов образцов монолитного базальта (м/с)

$$D = 3777,8 + 1,3708U; \quad D = 3403,4 + 1,4657U.$$

При давлениях до 10 ГПа можно принять согласно [10], что  $\rho\Gamma = \rho_0\Gamma_0 = const$ , где  $\Gamma_0 = \beta KV_0/c_V$  – коэффициент Грюнайзена при малых сжатиях, ( $\beta$  – коэффициент объемного теплового расширения,  $K$  – модуль объемного сжатия,  $V_0$  – удельный объем,  $c_V$  – удельная изохорная теплоемкость материала). Соответствующие параметры для базальта приведены в таблице 4 [12,13].

Таблица 4.

Физико-механические свойства минерального базальта.

$\beta, K^{-1}$	$K, ГПа$	$c_V, Дж/(кг \cdot К)$	$V_0, м^3/кг$	$\Gamma_0$
$1,620 \cdot 10^{-5}$	46,119	887	$3,525 \cdot 10^{-4}$	0,296917

Представляет интерес сопоставление энергетических характеристик ткани при ударном нагружении с аналогичными статическими характеристиками. На основе имеющихся данных о физико-механических характеристиках базальтового волокна, приведенных в таблице 5, оценивается удельная энергия разрушения слоя ткани по квазистатическим характеристикам в предположении линейности диаграммы до разрушения.

Таблица 5.

Физические характеристики базальтового непрерывного волокна [14].

Плотность, $кг/м^3$	2550...2950
Модуль упругости, ГПа	80-85
Температура плавления, $^{\circ}C$	1000-1200

Прочность, ГПа:	
при 20°С	3,8...4,1
при 400°С	3,6...3,9
при 200°С	3,0...3,3

Энергия разрушения единицы массы равна  $E_D^{(m)} = E_D / \rho_0 = 28,894$  кДж/кг.

Полученная характеристика энергии разрушения по статической диаграмме нагружения волокна может использоваться и для случая нагружения тканевого пакета ударной волной в поперечном направлении. Это обусловлено технологией получения волокон из расплава, обеспечивающей близкую к изотропной структуру волокна базальта.

В [10] предлагается рассматривать ткань, как пористый материал и использовать подход, позволяющий рассчитывать ударно-волновые характеристики пористых материалов с заданной пористостью по известным характеристикам сплошного вещества. Ткань как пористая среда характеризуется пористостью  $\mu = 1 - \rho_0 / \rho_m$ , где  $\rho_0$  – плотность пористого материала,  $\rho_m$  – плотность соответствующего монолитного материала.

В работе [10] приводится оценка пористости тканевого пакета: для наименее плотной кубической укладки нитей пористость слоя составляет  $\mu \approx 0,21$ , для наиболее плотной гексагональной укладки  $\mu \approx 0,093$ . Пористость пакета тканей может быть получена как сумма пористости слоя и межслойной пористости, которая, согласно рекомендациям может быть принята равной  $\mu_{мс} \approx 0,15$ .

Принимая согласно [11], что пористость материала можно рассматривать, как состояние сплошного материала при соответствующем объеме, к нему применяется энергетическое соотношение Гюгонио для двух значений начального объема:  $V_0$  (сплошной материал) и  $V'_0$  (материал с заданной пористостью), при равных значениях конечного объема  $V$  и используется уравнение состояния в форме Ми-Грюнайзена. В результате получается соотношение, связывающее давление на ударной адиабате сплошного материала  $P_H$  с соответствующим давлением  $P$  в пористом материале

$$P = P_H \frac{1 - \rho \Gamma \frac{(V_0 - V)}{2}}{1 - \rho \Gamma \frac{(V'_0 - V)}{2}}. \quad (2)$$

Используя выражение (2) можно получить соответствующую ударную адиабату  $D(U)$  пористого материала по известным характеристикам исходного сплошного материала (рис.8). Видно, что для пористой структуры характер зависимости может быть существенно нелинейным.

При достаточно большой пористости ( $V'_{0\max} \geq 2/\rho \Gamma + V_0 = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ ) соотношение (2) приводит к отрицательным давлениям. При этом плотность сплошного материала не достигаются ни при каких давлениях ударного сжатия. Согласно экспериментальным данным [11] в этом случае фронт ударной волны сильно размыт и используемая модель не описывает процесс. В этом случае

$$D(U) = bU, \quad b = 1/\mu = (\Gamma_0 + 2)/2. \quad (3)$$

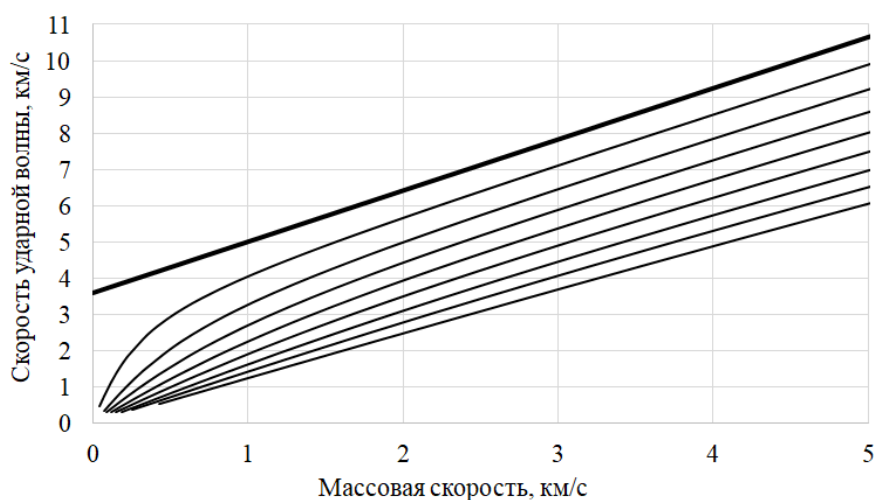


Рис.8.  $D(U)$  зависимости для базальта с различной пористостью в диапазоне от 0,1 до 0,8 (меньшие значения скорости ударной волны соответствуют большей пористости).

Предельная зависимость  $D(U)$  может использоваться для оценок характеристик ударно сжатых пористых материалов при полном отсутствии данных об их свойствах. В работе [10] выражение (3) используется для оценки ударно-волнового нагружения при соударении с пулями тканевого пакета, применяемого в бронезиловках. Оценить, достигается ли плотность сплошного базальта в проведенных экспериментах можно, сравнив полученные в результате обработки осциллограмм пиковые давления с давлениями, соответствующими максимальному контактному давлению при соударении ударника со сплошным базальтом. Для всех экспериментов выполняется условие, что измеренное давление больше или близко по значению к соответствующему расчётному давлению. Экспериментальное давление может превышать расчётное значение, так как при соударении пары материалов через тканевую прокладку давление будет стремиться к значению, реализующемуся при прямом контакте ударника и державки (пары «сталь-сталь»), превышающее давление контакта «сталь-базальт». Сравнение пиковых давлений приведено в таблице 6.

Таблица 6.

Расчётная оценка амплитуд давления и доли разрушенной массы.

Номер эксп.	Скорость удара, м/с	Давление, МПа	Расчётное давление, МПа	Длительность воздействия, мкс	Доля разрушенной массы по отношению к нагружаемой
1	199	-	921,20	-	-
2	212	-	982,54	-	0,469
3	121	697,65	724,89	16,8	0,140
4	199	1393,82	1204,50	19,2	0,588
5	130	805,67	779,74	22,6	0,197
6	100	824,51	597,40	10,4	0,197
7	78	678,06	464,60	9,2	0,163
8	77	454,10	458,58	10,8	0,143
9	293	-	1367,90	-	0,989

Оценка давления в тканевом пакете показывает, что при давлении  $\sim 1,5$  ГПа происходит полное дробление ткани, а доля разрушенной массы практически не зависит от длительности нагружения.

## 2.2. Определение энергии, поглощаемой тканевым материалом в области высоких давлений.

Рассматривая ткань как пористую среду и используя соотношение (2), можно определить необратимые энтропийные потери энергии при ударно-волновом нагружении материала с последующей разгрузкой. При этом для оценки величины энтропийных потерь используется приближенный подход, заключающийся в использовании вместо изоэнтропы разгрузки  $P_S(V, V_H)$  ударной адиабаты  $P_H(V)$ . Этот подход даёт хорошее приближение для металлов вплоть до давлений около 10 ГПа, так как на этом интервале изоэнтропа разгрузки близка к ударной адиабате. Приближение даёт верхнюю оценку потерь из-за возрастающего отклонения изоэнтроп от ударной адиабаты с ростом сжатия.

Необратимые потери определяются следующим соотношением [15]

$$E_D = \frac{1}{2} P_H (V_0 - V_H) - \int_{V_H}^{V_K} P_S (V, V_H) dV. \quad (4)$$

Величины с индексом «H» соответствуют значениям параметров на адиабате Гюгио. Из соотношений Ренкина-Гюгио в сочетании с линейной зависимостью  $D(U)$  следует связь давления с объемной деформацией

$$\varepsilon = V/V_0 - 1$$

$$P = -\rho_0 \frac{a^2 \varepsilon}{(1 + b\varepsilon)^2},$$

с помощью которой из (4) определяется верхняя оценка необратимых потерь удельной энергии как функция  $\varepsilon$

$$E_D = \frac{1}{2} \left( \frac{a}{b} \right)^2 \left[ \frac{b^2 \varepsilon_H^2}{(1 + b\varepsilon_H)^2} + \frac{2b\varepsilon_H}{1 + b\varepsilon_H} - 2 \ln(1 + b\varepsilon_H) \right].$$

Полученное выражение может напрямую быть использовано только для пористых структур, для которых зависимость  $D(U)$  линейна.

Оценим пористость тканевого пакета, исследуемого в экспериментах. Измеренные значения толщины слоя базальтовой ткани лежат в пределах (0,35-0,4) мм, что соответствует пористости (0,194-0,295). Измерения толщины многослойного тканевого пакета дают значения, близкие кратно увеличенной толщине слоя. Следовательно, учитывая, что в эксперименте ткань плотно прижимается к державке прижимной шайбой, можно пренебречь межслоевой пористостью и считать пористость тканевого пакета равной пористости одиночного слоя ткани. При расчёте энергии, поглощаемой тканевым пакетом, используется среднее значение пористости 0,245.

Согласно полученным результатам расчёта по (2) (рис.8), зависимость  $D(U)$  для пористости 0,245 нелинейна. В связи с этим интеграл в (4) вычисляется численно, используя давления в пористом материале, рассчитанные по формуле (2), что позволяет автоматически учесть форму ударной адиабаты в зависимости от заданной начальной пористости нагружаемого материала.

Сравнение результатов расчёта потерь энергии в тканевом пакете и соответствующих экспериментальных результатов (таблица 3) дано на рис.9. Заметим, что удельная энергия статического разрушения, вычисленная выше, составляет 28 кДж/кг.

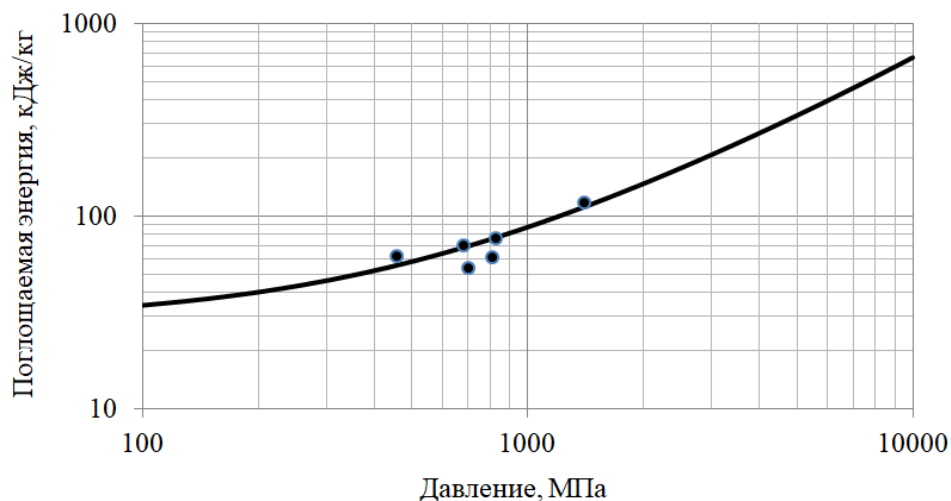


Рис.9. Сравнение расчётной зависимости потерь в тканевом пакете при ударно-волновом сжатии от давления нагружения с экспериментальными результатами (показаны точками).

Видно, что в достигнутом в экспериментах диапазоне расчётная кривая близка к точкам, соответствующим экспериментальным результатам. Зависимость энергии, поглощаемой базальтовой тканью с пористостью 0,245 от давлений до 10 ГПа может быть представлена полиномиальным трендом второго порядка

$$E_D(P) = 5 \cdot 10^{-7} P^2 + 0,0577 P + 28,894.$$

Здесь  $[P] = \text{МПа}$ ,  $[E_D] = \text{кДж}$ .

Описанный выше подход может быть использован для получения аналогичных кривых поглощения энергии для тканевых пакетов с другими характеристиками. Возможность его применения подтверждается хорошим согласованием результатов расчёта со значениями, полученными в экспериментах.

На рис.10 показано семейство кривых поглощаемой базальтовой тканью энергии в зависимости от пористости пакета.

Видно, что характер кривой поглощаемой энергии при увеличении пористости становится близким к линейному, тогда как для пористости 0,1 кривая существенно нелинейна.

Близость зависимости «энергия – давление» к линейной может быть объяснена, исходя и зависимости (4). Согласно выполненным оценкам, интеграл

$\int_{V_H}^{V_0} P_S(V, V_H) dV$  при большой пористости с увеличением давления быстро становится малым по сравнению с площадью треугольника  $0,5 P_H (V_0 - V_H)$ .

Для малой пористости их отношение может составлять 30-50%, но для пористости, близкой к предельному значению (3) оно составляет около 5%. Следовательно, пренебрегая вторым слагаемым, можно дать следующую оценку

$$E_D \approx \frac{1}{2} P_H (V_0 - V_H) = \frac{1}{2} P_H V_0 \left( 1 - \frac{V_H}{V_0} \right) \approx \frac{1}{2} P_H V_0 \mu.$$

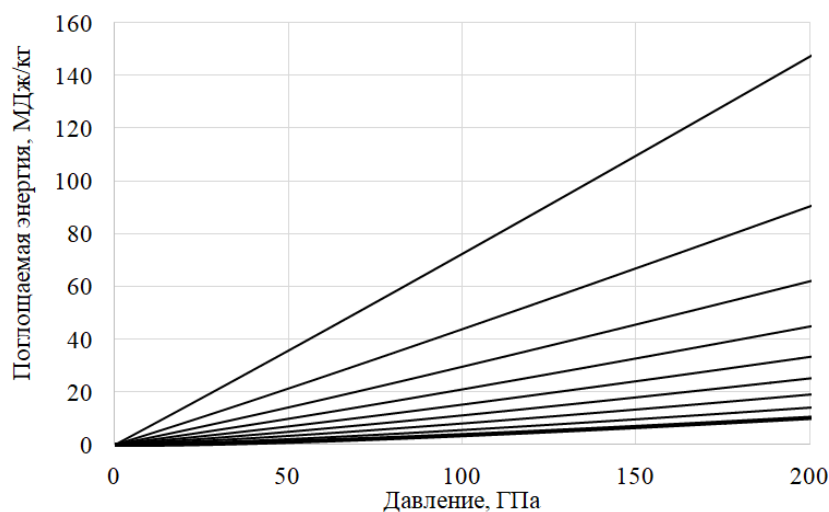


Рис.10. Энергия, поглощаемая базальтовой тканью в зависимости от пористости пакета в диапазоне от 0,1 до 0,8 (большие значения поглощаемой энергии соответствуют большей пористости).

Это выражение справедливо в рамках предположения, что  $V_H/V_0$  с ростом давления меняется слабо, что справедливо для ситуации, когда  $V_0$  значительно превышает  $V_H$ . Величина  $(1 - V_H/V_0)$  для материала, по плотности близкого к сплошному, с ростом давления меняется примерно на 400%, в то время как для материала со значительной пористостью только на 6%.

Таким образом, при увеличении пористости поглощаемая материалом энергия становится пропорционально давлению в ударной волне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные данные об удельной энергии разрушения базальтовой ткани в условиях нагружения, характерных для тканевых пакетов промежуточных экранов ЭЗК, применяемых для защиты орбитальных космических станций от ударов частиц космического мусора.

Построена модель тканевого экрана как пористой среды, на основе которой получена оценка необратимых потерь энергии при разрушении тканевого пакета при давлении до 10 ГПа. Полученные результаты согласуются с данными экспериментов в достигнутом диапазоне давления (до 1,5 ГПа).

Полученные результаты предназначены для использования при проектировании и расчете ЭЗК модулей орбитальных пилотируемых станций с высокими требованиями к ударной стойкости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агапов В.М. и др. *Космический мусор. В 2 книгах. Книга 1. Методы наблюдения и модели космического мусора.* – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 248 с.

2. Whipple F.L. *Meteorites and Space Travel* // *Astronomical Journal*. – 1947. – Vol.52 – Pp.131.
3. Марков А.В., Коношенко В.П., Беглов Р.И., Соколов В.Г., Горбенко А.В. *Основные направления и результаты работ по защите Российского сегмента МКС от метеороидов и космического мусора* // *Космическая техника и технологии*. – 2018. – №4(23). – С.16-28.
4. Папков С.П. *Полимерные волокнистые материалы*. – М.: Химия, 1986. – 224 с.
5. Фомин В.М. и др. *Высокоскоростное взаимодействие тел*. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. – 600 с.
6. Wang B. et al. *Energy absorption efficiency of carbon fiber reinforced polymer laminates under high velocity impact* // *Materials and Design*. – 2013. – Vol.50 – Pp.140-148.
7. Weimin L., Jinyu X. *Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar* // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol.513-514 – Pp.145-153.
8. Batra R.C., Hassan N.M. *Blast resistance of unidirectional fiber reinforced composites* // *Composites Part B: Engineering*. – 2008. – Vol.39 – Pp.513-536.
9. Chen W.W., Song B. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar. Design, Testing and Applications*. – New York: Springer Science+Business Media, 2011. – 388 p.
10. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. *Материалы и структуры легкой бронезащиты*. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 191 с.
11. Кинслоу Р. *Высокоскоростные ударные явления*. – М.: Мир, 1973. – 533 с.
12. Sydney P.C.Jr. *Handbook of Physical Constants: Revised edition*. – New Haven, Connecticut: Yale University, The geological society of America, 1966. – 587 p.
13. Петрунин Г.И., Попов В.Г. *Теплофизические свойства вещества Земли*. – М.: Физический факультет МГУ, 2011. – Часть 1. – 68 с.
14. Перепелкин К.Е. *Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты*. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 400 с.
15. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. – М.: Физматгиз, 1968. – 688 с.

## REFERENCES

1. Agapov V.M. et al. *Kosmicheskij musor. V 2 knigakh. Kniga 1. Metody nablyudeniya i modeli kosmicheskogo musora [Space debris. 2 Volumes. Vol.1. Observation methods and space debris models]*. Moskva, FIZMATLIT, 2014, 248 p.
2. Whipple F.L. *Meteorites and Space Travel*. *Astronomical Journal*, 1947, Vol.52, Pp.131.
3. Markov A.V. et al. *Main areas and results of work to protect the ISS Russian segment from meteoroids and space debris*. *The Space Engineering and Technologies*, 2018, Vol.4(23), Pp.16-28.
4. Papkov S.P. *Polimernye voloknistye materialy [Polymeric fibrous materials]*. Moskva, Khimiya, 1986, 224 p.
5. Fomin V.M. et al. *Vysokoskorostnoe vzaimodejstvie tel [High speed body interaction]*. *Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN*, 1999, 600 p.
6. Wang B. et al. *Energy absorption efficiency of carbon fiber reinforced polymer laminates under high velocity impact*. *Materials and Design*, 2013, Vol.50, Pp.140-148.

7. Weimin L., Jinyu X. *Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar*. Materials Science and Engineering: A, 2009, Vol.513-514, Pp.145-153.
8. Batra R.C., Hassan N.M. *Blast resistance of unidirectional fiber reinforced composites*. Composites Part B: engineering, 2008, Vol.39, Pp.513-536.
9. Chen W.W., Song B. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar. Design, Testing and Applications*. New York, Springer Science+Business Media, 2011, 388 p.
10. Kobylkin I.F., Selivanov V.V. *Materialy i struktury legkoj bronezashhity [Materials and structures of lightweight armor]*. Moskva, Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana, 2014, 191 p.
11. Kinslow R. *High-Velocity Impact Phenomena*. Cookeville, Tennessee, Department of engineering science Tennessee Technological University, 1970, 579 p.
12. Sydney P.C.Jr. *Handbook of Physical Constants: Revised edition*. New Haven, Connecticut, Yale University, The geological society of America, 1966, 587 p.
13. Petrunin G.I., Popov V.G. *Teplofizicheskie svoystva veshhestva Zemli [Thermophysical properties of the Earth substance]*. Moskva, Fizicheskij fakul'tet Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, 2011, Vol.1, 68 p.
14. Perepelkin K.E. *Armiruyushhie volokna i voloknistye polimernye kompozity [Reinforcing fibers and fibrous polymer composites]*. Sankt-Peterburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2009, 400 p.
15. Zel'dovich Ya.B., Rajzer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavlenij [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]*. Moskva, Fizmatgiz, 1968, 688 p.

Поступила в редакцию 29 апреля 2021 года.

---

Сведения об авторах:

Онучин Егор Сергеевич – м.н.с., Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»), г. Королев, Россия; e-mail: [oes92@yandex.ru](mailto:oes92@yandex.ru)

Фельдштейн Валерий Адольфович – д.т.н., г.н.с., Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»), г. Королев, Россия; e-mail: [dinpro@mail.ru](mailto:dinpro@mail.ru)

Товарнова Наталья Александровна – к.т.н., нач. сектора, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»), г. Королев, Россия; e-mail: [ntovarnova@gmail.com](mailto:ntovarnova@gmail.com)

Васильченко Леонид Борисович – нач. сектора, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»), г. Королев, Россия; e-mail: [make.geksaedr@gmail.ru](mailto:make.geksaedr@gmail.ru)

Орлов Дмитрий Алексеевич – нач. группы, Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»), г. Королев, Россия; e-mail: [rlodv200808@rambler.ru](mailto:rlodv200808@rambler.ru)