

УДК 678.067.7

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

© 2018 г. Аккуратов И.Л., Алямовский А.И., Виноградов А.С., Герасимова Т.И.,  
Земцова Е.В., Кириллов С.В., Копыл Н.И., Магжанов Р.М.,  
Сеньковский А.Н., Соколова С.П., Щербаков Э.В.

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)  
Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rscce.ru

*Композиционные материалы – углепластики имеют высокие удельные характеристики прочности и жесткости в сравнении с традиционными конструкционными материалами. В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований углепластиков на основе различных углеродных наполнителей и полимерных связующих: ПСБ250/А, ПСБ250/Б, ПСБ250/В, 22500/НИИКАМ-РС, КМКУ-4м.175, КМУ-4Э, КМКУЗ.150.Э01 для оценки возможности их использования при изготовлении высоконагруженных конструкций космической техники. В результате проведенных исследований определены следующие характеристики: физико-механические, теплофизические, оптические, электрофизические, уровень газовыделения в вакууме, степень негерметичности образцов материалов по гелиево-воздушной смеси, параметры безопасного применения, включая токсикологическую и пожарную безопасность и микробиологическую стойкость. Эти характеристики необходимы для проектного расчета указанных выше конструкций.*

**Ключевые слова:** углепластик, связующие, конструкции из углепластиков, гермо-замкнутый обитаемый отсек, композиционные материалы.

## RESULTS OF STUDIES INTO THE PROPERTIES OF CARBON FIBER-REINFORCED PLASTICS BASED ON VARIOUS POLYMER BINDERS, VIEWED AS CANDIDATES FOR MANUFACTURING STRUCTURES FOR SPACE HARDWARE

Akkuratov I.L., Alyamovskiy A.I., Vinogradov A.S., Gerasimova T.I.,  
Zemtsova E.V., Kirillov S.V., Kopyl N.I., Magzhanov R.M.,  
Senkovskiy A.N., Sokolova S.P., Shcherbakov E.V.

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia)  
4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rscce.ru

*Selected for manufacturing structures of space hardware that have to bear high loads (primary structure of the front heat shield, aerodynamic shell, propulsion section body and pressurized habitable compartment) are composite materials – carbon fiber-reinforced plastics that have high specific strength and stiffness as compared with traditional structural materials. This article provides results of experimental studies on carbon plastics based on various carbon filler and polymer binders: PSB250/A, PSB250/B, PSB250/V, 22500/NIKAM-RS, KMKU-4m.175, KMU-4E, KMKUZ.150.E01. The studies resulted in determining the following*

*properties: mechanical, thermal, optical, electrical, off-gassing level in vacuum, material samples leakage using helium/air mixture, safe use parameters, including toxicology and fire safety and microbiological resistance. These properties are required for the design analysis of the above structures.*

**Key words:** carbon fiber-reinforced plastic, binders, carbon fiber-reinforced plastics, pressurized habitable compartment, composite materials.

АККУРАТОВ Игорь Леонидович — кандидат технических наук, начальник лаборатории РКК «Энергия», e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)  
AKKURATOV Igor Leonidovich — Candidate of Science (Engineering), Head of Laboratory at RSC Energia, e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)

АЛЯМОВСКИЙ Андрей Иванович — кандидат технических наук, заместитель начальника отдела РКК «Энергия», e-mail: [andrey.alyamovskiy@rsce.ru](mailto:andrey.alyamovskiy@rsce.ru)  
ALYAMOVSKIY Andrey Ivanovich — Candidate of Science (Engineering), Deputy Head of Department at RSC Energia, e-mail: [andrey.alyamovskiy@rsce.ru](mailto:andrey.alyamovskiy@rsce.ru)

ВИНОГРАДОВ Алексей Сергеевич — ведущий инженер РКК «Энергия», e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)  
VINOGRADOV Aleksey Sergeevich — Lead engineer at RSC Energia, e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)

ГЕРАСИМОВА Татьяна Ивановна — инженер-технолог 1 категории РКК «Энергия», e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)  
GERASIMOVA Tatyana Ivanovna — Processing Engineer 1 category at RSC Energia, e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)

ЗЕМЦОВА Елена Владимировна — инженер-технолог 2 категории РКК «Энергия», e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)  
ZEMTSOVA Elena Vladimirovna — Processing Engineer 2 category at RSC Energia, e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)

КИРИЛЛОВ Станислав Валерьевич — начальник сектора РКК «Энергия», e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)  
KIRILLOV Stanislav Valeryevich — Head of Subdepartment at RSC Energia, e-mail: [post@rsce.ru](mailto:post@rsce.ru)

КОПЫЛ Николай Иванович — кандидат технических наук, начальник отдела РКК «Энергия», e-mail: [nikolay.kopyl@rsce.ru](mailto:nikolay.kopyl@rsce.ru)  
KOPYL Nikolay Ivanovich — Candidate of Science (Engineering), Head of Department at RSC Energia, e-mail: [nikolay.kopyl@rsce.ru](mailto:nikolay.kopyl@rsce.ru)

МАГЖАНОВ Раис Мухтясибович — заместитель генерального конструктора РКК «Энергия», e-mail: [rais.magzhanov@rsce.ru](mailto:rais.magzhanov@rsce.ru)  
MAGZHANOV Rais Mukhtyasibovich — Deputy General Designer of RSC Energia, e-mail: [rais.magzhanov@rsce.ru](mailto:rais.magzhanov@rsce.ru)

СЕНЬКОВСКИЙ Александр Николаевич — начальник лаборатории РКК «Энергия», e-mail: [alexander.senkovsky@rsce.ru](mailto:alexander.senkovsky@rsce.ru)  
SENKOVSKIY Alexander Nikolayevich — Head of Laboratory at RSC Energia, e-mail: [alexander.senkovsky@rsce.ru](mailto:alexander.senkovsky@rsce.ru)

СОКОЛОВА Светлана Павловна — начальник лаборатории РКК «Энергия», e-mail: [svetlana.sokolova@rsce.ru](mailto:svetlana.sokolova@rsce.ru)  
SOKOLOVA Svetlana Pavlovna — Head of Laboratory at RSC Energia, e-mail: [svetlana.sokolova@rsce.ru](mailto:svetlana.sokolova@rsce.ru)

ЩЕРБАКОВ Эдуард Викторович — заместитель руководителя НТЦ РКК «Энергия», e-mail: [edward.scherbakov@rsce.ru](mailto:edward.scherbakov@rsce.ru)  
SHCHERBAKOV Eduard Viktorovich — Deputy Head of STC at RSC Energia, e-mail: [edward.scherbakov@rsce.ru](mailto:edward.scherbakov@rsce.ru)

## Введение

В РКК «Энергия» осуществляется разработка высоконагруженных конструкций транспортных кораблей из композиционных материалов на основе углеродных наполнителей. На этапе проектно-конструкторских работ особое внимание уделяется минимизации массы этих конструкций. После детального анализа различных вариантов снижения массы конструкции было принято решение выполнить ряд агрегатов (силовой каркас лобового теплозащитного экрана, аэродинамическую оболочку, корпус двигательного отсека) в виде трехслойных сотовых конструкций с несущими слоями из углепластика. Преимущества углепластиков в сравнении с традиционными конструкционными материалами (алюминиевые и титановые сплавы) общеизвестны — низкая плотность, высокие удельные характеристики прочности и жесткости, низкий коэффициент линейного расширения и др. [1]. Также были проведены оценочные исследования свойств углепластиков с целью их возможного применения для изготовления корпусов гермозамкнутых обитаемых отсеков (ГЗОО).

Целью настоящей работы являлось исследование свойств углепластиков на основе различных полимерных связующих для изготовления перспективных конструкций изделий космической техники.

## Объекты исследований

Композиционные материалы (КМ) — углепластики на основе различных углеродных наполнителей и полимерных связующих:

- углепластик ПСБ250/А на основе углеродной ткани марки 22500 и бисмалеимидного связующего SB-250 (УП-1), схема армирования углепластиков  $[0^\circ/90^\circ]_n$ , где  $n$  — количество слоев;

- углепластик ПСБ250/Б на основе однонаправленной углеродной ленты Кулон-500/0,11 и бисмалеимидного связующего SB-250 (УП-2);

- углепластик ПСБ250/В на основе однонаправленной углеродной ленты из волокна марки IMS65 и бисмалеимидного связующего SB-250 (УП-3);

- углепластик КМКУ3.150 на основе углеродной ленты Элур-0,1П и модифицированного эпоксидного связующего (УП-4);

- углепластик КМУ-4Э на основе углеродной ленты Элур-0,2П и связующего ЭНФБ (УП-5);

- углепластик КМКУ-4м.175 на основе ткани марки УТ-900 и модифицированного эпоксидного связующего (УП-6), схема армирования  $[0^\circ/90^\circ]$ ;

- углепластик 22500/НИИКАМ-РС на основе углеродной ткани марки 22500 и цианатэфирного связующего (УП-7), схема армирования  $[0^\circ/90^\circ]$ .

Технологические режимы изготовления образцов углепластиков представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Технологические режимы изготовления образцов углепластиков

Марка углепластика	Технология изготовления	Режим отверждения
УП-1	Вакуумно-прессовое формование	Нагрев до 180 °С и выдержка при 180 °С в течение 390 мин
УП-2		
УП-3		
УП-4		Нагрев до (175±5) °С и выдержка в течение 180 мин, давление прессования 5 кгс/см <sup>2</sup>
УП-5		Нагрев до (165±5) °С и выдержка в течение 360 мин
УП-6		Нагрев до (175±5) °С и выдержка в течение 180 мин
УП-7		Нагрев до (180±5) °С и выдержка в течение 180 мин

## Требования к силовым конструкциям

К силовым конструкциям предъявляются следующие требования:

- наличие вырезов: люки, иллюминаторы и т. д.;

- высокий уровень сосредоточенных нагрузок в интерфейсах;

- циклические температурные воздействия;

- обеспечение высокой точности геометрии конструкций при габаритах до 4 000 мм (в интервале эксплуатационных температур);

- минимизация дефектов, снижение пористости;

- герметичность конструкции (для ГЗОО);

- обеспечение требуемого ресурса.

Материалы, применяемые для изготовления ГЗОО, должны дополнительно отвечать следующим требованиям:

- низкая степень негерметичности;

- пожаробезопасность;

- низкое токсическое газовыделение;

- микробиологическая стойкость.

**Результаты механических испытаний**

Все испытания по определению механических свойств углепластиков проводились на универсальной испытательной машине *Zwick Z-150*.

Определялись следующие механические характеристики углепластиков:

- предел прочности и модуль упругости, коэффициент Пуассона при растяжении [2];
- предел прочности при сжатии [3];
- предел прочности и модуль упругости при сдвиге [4];
- предел прочности при смятии [5].

Требования, предъявляемые к механическим характеристикам углепластиков, представлены в табл. 2.

Результаты испытаний по определению механических характеристик представлены в табл. 3. Испытания проводились на пяти

образцах для каждого вида испытаний при одинаковой температуре.

Таблица 2

**Требуемые механические характеристики углепластиков (не менее)**

Характеристика	Температура, °С	
	20	150
Модуль упругости при растяжении $E_{p1}$ , ГПа	140/60	125/50
Модуль упругости при сжатии $E_{сж1}$ , ГПа	120/60	100/45
Предел прочности при растяжении $\delta_p$ , МПа	700/600	600/550
Предел прочности при сжатии $\delta_{сж}$ , МПа	600/600	500/500
Модуль упругости при сдвиге $G_{12}$ , ГПа	4/4	3/3

*Примечание:* В числителе — значения для углепластиков на основе однонаправленной ленты, в знаменателе — для углепластиков на основе ткани.

Таблица 3

**Результаты механических испытаний углепластиков при нормальной и повышенных температурах**

Механические свойства	Температура испытаний, °С	Марка углепластика					
		УП-1	УП-2	УП-3	УП-5	УП-6	УП-7
$\sigma_{p1}$ , МПа	20	<u>787...989</u> 912	<u>697...875</u> 788	<u>1 490...1 990</u> 1 740	<u>699...879</u> 795	<u>555...630</u> 563	<u>723...824</u> 801
	180	—	—	—	—	<u>366...447</u> 419	<u>659...745</u> 725
	195	<u>666...987</u> 882	<u>734...911</u> 794	<u>1 620...1 710</u> 1 690	—	—	—
$E_{p1}$ , ГПа	20	<u>62,7...67,8</u> 64,9	<u>255...315</u> 289	<u>135...173</u> 154	<u>146</u> 146	<u>55,1...63,1</u> 59,7	<u>57,9...67,0</u> 63,8
	180	—	—	—	—	<u>36,4...61,4</u> 53,5	<u>54,0...67,8</u> 59,7
	195	<u>61,6...72,4</u> 65,7	<u>209...273</u> 246	<u>123...148</u> 137	—	—	—
$\mu_1$	20	<u>0,049...0,084</u> 0,064	<u>0,049...0,331</u> 0,26	<u>0,281...0,304</u> 0,292	—	<u>0,058...0,082</u> 0,067	<u>0,042...0,052</u> 0,053
	180	—	—	—	—	<u>0,089...0,194</u> 0,144	<u>0,019...0,049</u> 0,035
	195	<u>0,058...0,086</u> 0,068	<u>0,172...0,251</u> 0,217	<u>0,220...0,299</u> 0,272	—	—	—
$\sigma_{p2}$ , МПа	20	—	<u>8,37...9,86</u> 8,86	<u>34,3...40,3</u> 36,8	<u>22,4...31,4</u> 27,4	—	—
	195	—	<u>7,55...9,63</u> 8,49	<u>31,7...38,0</u> 35,6	—	—	—
$E_{p2}$ , ГПа	20	—	<u>6,95...7,94</u> 7,68	<u>9,92...10,4</u> 10,1	<u>9,23...10,4</u> 9,82	—	—
	195	—	<u>5,18...7,12</u> 6,21	<u>8,58...9,47</u> 8,92	—	—	—

Механические свойства	Температура испытаний, °С	Марка углепластика					
		УП-1	УП-2	УП-3	УП-5	УП-6	УП-7
$\mu_2$	20	—	<u>0,015...0,020</u> 0,014	<u>0,023...0,027</u> 0,026	<u>0,013...0,039</u> 0,026	—	—
	195	—	<u>0,006...0,015</u> 0,010	<u>0,030...0,055</u> 0,044	—	—	—
$\sigma_{сж1}$ , МПа	20	<u>741...863</u> 787	<u>293...353</u> 318	<u>711...1 000</u> 866	—	<u>646...722</u> 698	<u>624...693</u> 659
	180	—	—	—	—	<u>160...190</u> 176	<u>439...504</u> 479
	195	<u>613...773</u> 655	<u>165...212</u> 180	<u>527...618</u> 587	—	—	—
$\sigma_{сж2}$ , МПа	20	—	<u>92,2...106</u> 99,6	<u>153...187</u> 171	<u>121,85...134,95</u> 132,52	—	—
	195	—	<u>66,1...86,6</u> 76,8	<u>104...121</u> 114	—	—	—
$\tau_{1,2}$ , МПа	20	<u>87,0...96,94</u> 92,36	<u>20,52...23,11</u> 21,46	<u>91,83...94,84</u> 94	<u>62,6...66,0</u> 64,3	<u>75,13...82,17</u> 79,38	<u>84,32...87,65</u> 85,64
	180	—	—	—	—	<u>17,72...18,7</u> 18,22	<u>40,43...44,64</u> 42,57
	195	<u>63,95...71,31</u> 67,9	<u>18,20...19,84</u> 19,0	<u>58,05...61,78</u> 60,12	—	—	—
$G_{1,2}$ , ГПа	20	<u>3,97...5,69</u> 4,88	<u>2,74...2,95</u> 2,87	<u>6,45...6,75</u> 6,62	<u>46,23...58,24</u> 54,79	<u>4,96...6,30</u> 5,55	<u>4,29...4,81</u> 4,56
	180	—	—	—	—	<u>0,58...0,72</u> 0,65	<u>3,06...3,26</u> 3,19
	195	<u>3,94...4,62</u> 4,28	<u>2,15...2,48</u> 2,3	<u>4,07...4,84</u> 4,44	—	—	—
$\sigma_{см}$ , МПа	20	<u>735...802</u> 767	<u>115,11...168,27</u> 145,45	<u>403,24...535,24</u> 470,8	375...392 381	<u>438,64...525,02</u> 469,40	<u>455,63...503,73</u> 483,40
	180	—	—	—	—	<u>149,01...192,19</u> 165,33	<u>328,25...376,11</u> 359,27
	195	<u>468...561</u> 523	—	<u>338,19...437,66</u> 380,48	—	—	—
$\tau_{мс}$ , МПа	20	<u>75,32...89,75</u> 84,32	<u>27,26...29,63</u> 28,49	<u>65,90...69,51</u> 67,52	<u>54,31...60,14</u> 56,53	<u>65,65...73,45</u> 69,2	<u>59,02...62,09</u> 60,1
	180	—	—	—	—	<u>19,74...23,0</u> 22	<u>43,92...47,29</u> 45
	195	<u>67,35...69,93</u> 68,24	<u>23,14...24,29</u> 23,69	<u>52,18...54,89</u> 53,43	—	—	—

*Примечание:*  $\sigma_{p1}$  — предел прочности при растяжении вдоль направления основы ткани или вдоль направления армирования ленты;  $\sigma_{p2}$  — предел прочности при растяжении поперек направления основы ткани или направления армирования ленты;  $E_{p1}$  — модуль упругости при растяжении вдоль направления основы ткани или вдоль направления армирования ленты;  $E_{p2}$  — модуль упругости при растяжении поперек направления основы ткани или направления армирования ленты;  $\mu_1$  — коэффициент Пуассона вдоль направления основы ткани или вдоль направления армирования ленты;  $\mu_2$  — коэффициент Пуассона поперек направления основы ткани или направления армирования ленты;  $\sigma_{сж1}$  — предел прочности при сжатии вдоль направления основы ткани или вдоль направления армирования ленты;  $\sigma_{сж2}$  — предел прочности при сжатии поперек направления основы ткани или направления армирования ленты;  $\tau_{1,2}$  — предел прочности при сдвиге ( $\pm 45^\circ$ );  $G_{1,2}$  — модуль упругости при сдвиге;  $\sigma_{см}$  — предел прочности при смятии;  $\tau_{мс}$  — предел прочности при сдвиге (по слою). В числителе приведены диапазоны значений механического свойства; в знаменателе — их средние значения.

Механические свойства исследованных углепластиков соответствуют требованиям, предъявляемым к высоконагруженным конструкциям космической техники.

### Результаты циклических испытаний

Циклические испытания углепластиков на растяжение–сжатие проводили в ЦНИИмаш на электродинамической испытательной машине *Instron Electropuls E10000*, обеспечивающей заданный режим нагружения по амплитуде и частоте.

Усталостные характеристики на базе  $10^4$  циклов получены для всех марок углепластиков. Для УП-1 получены характеристики на базе  $10^6$  циклов. Испытания проводились на пяти образцах для одного цикла нагружения.

Результаты циклических испытаний для УП-1 на базе  $10^6$  циклов представлены на рис. 1.

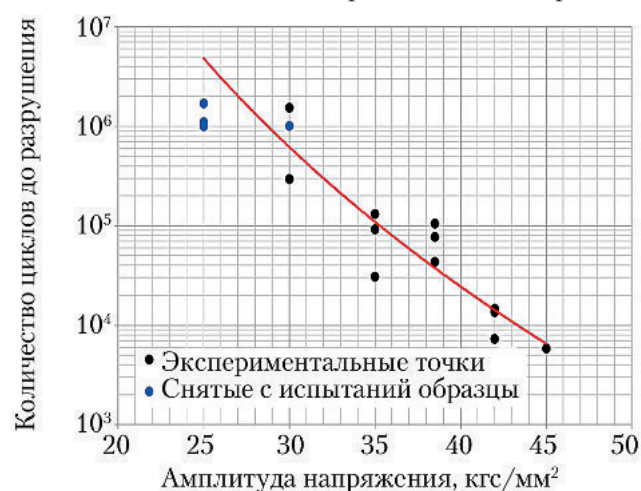


Рис. 1. Зависимость количества циклов до разрушения от амплитуды напряжений образцов УП-1

Результаты испытаний углепластиков исходных и на базе  $10^4$  циклов представлены в табл. 4.

Таблица 4

### Результаты испытаний углепластиков исходных и на базе $10^4$ циклов

Марка углепластика	$\sigma_p$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_{p-сж}$ , МПа
УП-1	912	788	430
УП-2	794/8,86	318/239	200
УП-3	1740/36,8	866/171	400
УП-6	563	698	320
УП-7	801	659	370

Примечание:  $\sigma_{p-сж}$  – предел прочности при циклическом растяжении–сжатии. Числитель – направление приложения нагрузки вдоль армирования  $0^\circ$ ; знаменатель – направление приложения нагрузки вдоль армирования  $90^\circ$ .

Наибольшее значение циклической прочности при растяжении–сжатии получено при испытаниях УП-3 на основе высокопрочной однонаправленной углеродной ленты из волокна марки *IMS65*.

Для углепластиков наблюдается падение прочности на базе  $10^4$  циклов по сравнению с исходной:

- для УП-1 на 47% (по  $\sigma_p$ ) и на 54% (по  $\sigma_{сж}$ );
- для УП-2 на 25% (по  $\sigma_p$ ) и на 63% (по  $\sigma_{сж}$ );
- для УП-3 на 23% (по  $\sigma_p$ ) и на 46% (по  $\sigma_{сж}$ );
- для УП-6 на 57% (по  $\sigma_p$ ) и на 46% (по  $\sigma_{сж}$ );
- для УП-7 на 46% (по  $\sigma_p$ ) и на 57% (по  $\sigma_{сж}$ ).

### Результаты испытаний по определению ударной вязкости

Испытания по определению ударной вязкости проводились при нормальных условиях на маятниковом копре РН-300 с регулируемой энергией удара 77...300 Дж по ГОСТ [6] на пяти образцах. Сущность метода заключается в испытании, при котором образец, лежащий на двух опорах, подвергается удару маятника в средней части образца. Испытания проводились с энергией удара 77 Дж при скорости удара от 2,783 м/с. Расстояние между опорами – 40 мм.

Ударная вязкость разрушения для углепластиков составила:

- УП-1 – 168,3/125,8 кДж/м<sup>2</sup>;
- УП-2 – 6,75/5,0 кДж/м<sup>2</sup>;
- УП-3 – 182,5/145 кДж/м<sup>2</sup>;
- УП-6 – 40...42,5/40...57,5 кДж/м<sup>2</sup>;
- УП-7 – 100/142,8 кДж/м<sup>2</sup>.

При этом числитель – направление испытания вдоль узкой стороны образца; знаменатель – направление испытания вдоль широкой стороны образца.

### Результаты определения межслоевой вязкости разрушения (удельной работы расслоения)

Удельная работа расслоения определялась согласно ГОСТ [7] на пяти образцах.

Испытания при нормальной температуре проводили на универсальной испытательной машине *Zwick Z-150* с датчиком усилия до 1 кН. Испытания заключались в непрерывном нагружении образцов с постоянной скоростью деформирования 2 мм/мин. Усилия раскрытия прилагались к образцу через специальные петли. Специальное приспособление для проведения испытаний представлено на рис. 2.

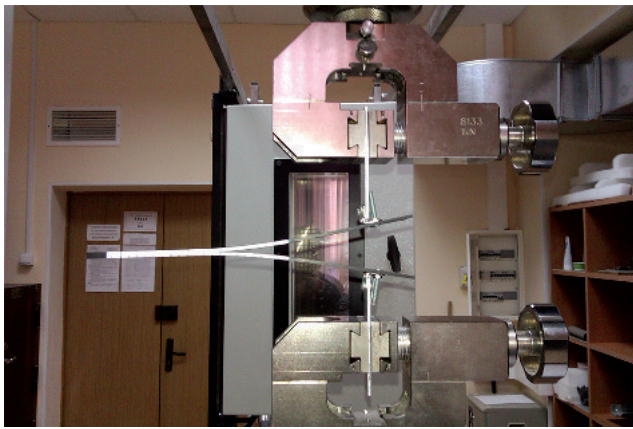


Рис. 2. Специальное приспособление для определения межслоевой вязкости разрушения

Испытания образцов проводились с записью диаграммы «нагрузка–длина раскрытия трещины», представленной на рис. 3. Одновременно замерялась длина раскрытия трещины.

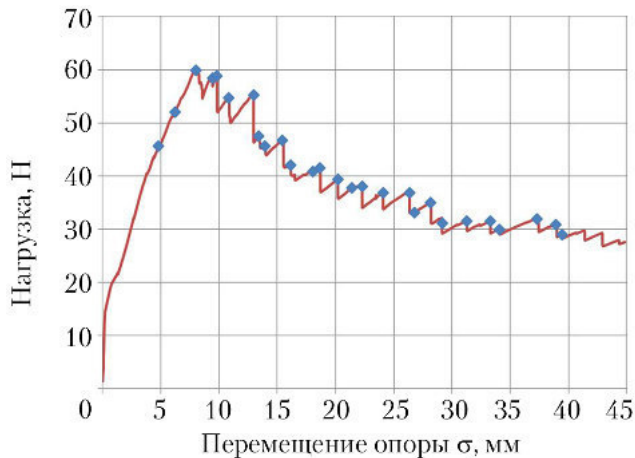


Рис. 3. Диаграмма зависимости «нагрузка – длина раскрытия трещины»: ■ – кривая нагружения

Результаты определения межслоевой вязкости разрушения (удельной работы расслоения) представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Результаты определения межслоевой вязкости разрушения (удельной работы расслоения)**

Марка углепластика	Удельная работа расслоения $G_{1c}$ , кДж/м <sup>2</sup>	
	При распространении трещины	В начале роста трещины
УП-1	0,265	0,173
УП-2	0,28	0,165
УП-3	0,27	0,098
УП-6	0,52	0,228
УП-7	0,44	0,196

**Определение теплофизических характеристик**

Определение теплопроводности  $\lambda_z$  (в направлении, перпендикулярном слоям ткани, Вт/(м·К)) проводилось прибором ИТП МГ-4 на экспериментальных установках ВКУ и В13-11 в соответствии с ГОСТ [8]. Испытаниям подвергалось по пять образцов углепластиков каждого вида. Для компенсации отсутствия плоскостности и параллельности граней образцов, снижения и учета контактного теплового сопротивления использовались прокладки из материала ТП–ТРГ. Максимальная относительная погрешность измерения теплопроводности при температуре 20 °С составляет  $\pm 8\%$ , при температурах –60, 90, 150, 180 °С она составляет  $\pm 15\%$ . Результаты испытаний представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Результаты определения коэффициента теплопроводности**

Марка углепластика	Коэффициент теплопроводности углепластиков $\lambda_z$ , Вт/(м·К)				
	Температура испытаний, °С				
	–60	20	90	150	180
УП-1	0,44	0,54	0,58	0,61	0,62
УП-2	0,77	0,87	0,90	0,91	0,91
УП-3	0,60	0,71	0,74	0,76	0,76
УП-6	0,55	0,63	0,65	0,66	0,66
УП-7	0,45	0,53	0,55	0,56	0,56

Примечание. Разброс измеренных значений теплопроводности образцов углепластиков не более  $\pm 3\%$ .

Определение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР)  $\alpha_1$ , 1/К (параллельно слоям ткани для образцов на ее основе) проводилось dilatометром DIL 402 C/1/G [9]. Испытаниям подвергалось по пять образцов углепластиков каждого вида.

Условия измерения ТКЛР:

скорость нагрева образцов  $2,0 \pm 0,1$  °С/мин;  
 рабочая среда гелий;  
 давление  $750 \pm 15$  мм рт. ст.;  
 сила прижатия толкателя 0,15 Н.

Максимальная погрешность измерения ТКЛР составляет  $\pm 0,3 \cdot 10^{-6}$  1/К. Результаты испытаний представлены в табл. 7.

Таблица 7

### Результаты определения температурного коэффициента линейного расширения

Марка углепластика	Температурный коэффициент линейного расширения углепластиков $\alpha_l \cdot 10^6$ , 1/К				
	Температура испытаний, °С				
	-60	20	90	150	180
УП-1	$\frac{2,4...6,1}{3,7}$	$\frac{2,3...6,4}{3,8}$	$\frac{2,4...6,7}{3,9}$	$\frac{2,9...7,3}{4,4}$	$\frac{3,2...7,9}{4,7}$
УП-2*	$\frac{-1,5...-0,1}{-0,9}$	$\frac{-1,8...0}{-1,0}$	$\frac{-2,2...-0,2}{-1,1}$	$\frac{-2,4...-0,2}{-1,2}$	$\frac{-2,5...-0,2}{-1,2}$
УП-3*	-0,45	-0,60	-0,35	0,05	$\frac{-0,1...0,7}{0,25}$
УП-6	2,3	2,7	2,7	2,6	2,4
УП-7	$\frac{2,3...3,8}{2,8}$	$\frac{2,4...4,2}{3,0}$	2,8	2,8	2,8

*Примечание.* \* — результаты представлены для образцов углепластиков на основе однонаправленной ленты. В случае разброса измеренных значений ТКЛР, превышающих максимальную погрешность измерения, в числителе указаны минимальное и максимальное измеренные значения ТКЛР образцов, а в знаменателе — среднее значение ТКЛР для пяти образцов. ТКЛР (средний) рассчитывается по формуле:  $\bar{\alpha} = (l_t - l_0) / l_0(t - t_0)$ , где  $l_0$  — длина образца при температуре  $t_0 = 20$  °С;  $l_t$  — длина образца при температуре  $t$ .

Определение удельной теплоемкости (С, Дж/(кг·К)) проводилось калориметром дифференциальным сканирующим DSC 404 F1 в соответствии с ГОСТ [10]. *Условия испытаний:* образцы в виде спрессованного порошка помещались в тигель с крышкой из платинородиевого сплава; скорость нагрева образцов 5 °С/мин; рабочая среда — аргон; давление — атмосферное. Максимальная относительная погрешность измерения удельной теплоемкости составляет  $\pm 3\%$ . Результаты определения удельной теплоемкости углепластиков представлены в табл. 8.

Таблица 8

### Результаты определения удельной теплоемкости углепластиков

Удельная теплоемкость углепластиков, кДж/(кг·К)	Температура, °С			
	20	90	150	180
УП-1	0,85	1,02	$\frac{0,93...1,01}{0,97}$	$\frac{0,97...1,05}{1,02}$
УП-2	0,81	1,00	1,05	1,10
УП-3	0,77	$\frac{0,90...1,00}{0,94}$	$\frac{0,92...1,00}{0,95}$	$\frac{0,97...1,05}{1,00}$

Окончание табл. 8

Удельная теплоемкость углепластиков, кДж/(кг·К)	Температура, °С			
	20	90	150	180
УП-6	0,82	$\frac{0,92...1,08}{1,01}$	$\frac{1,01...1,20}{1,13}$	$\frac{1,06...1,28}{1,20}$
УП-7	0,87	1,04	1,14	$\frac{1,13...1,22}{1,17}$

*Примечание.* 1. Средние значения удельной теплоемкости при температуре 20 °С получены методом экстраполяции. 2. В случае разброса измеренных значений удельной теплоемкости, превышающих максимальную погрешность измерения, в числителе указаны минимальное и максимальное измеренные значения удельной теплоемкости образцов, а в знаменателе — среднее значение удельной теплоемкости для четырех образцов.

### Определение оптических характеристик

Определение оптических характеристик проводилось в соответствии с ГОСТ [11] на трех образцах. Определение оптических характеристик — коэффициента поглощения солнечной радиации  $A_s$  и излучательной способности  $\epsilon$  образцов углепластиков на основе различных препрегов — проводилось с помощью переносных серийных накладных фотометра ФМ-59 и терморадиометра ТРМ-«И». Значения измерений термооптических характеристик образцов углепластиков представлены в табл. 9.

Таблица 9

### Значения измерений термооптических характеристик образцов углепластиков

Марка углепластика	$A_s$	$\epsilon$
УП-1	0,91	0,82...0,83
УП-2	0,91	0,81...0,83
УП-3	0,92	0,83
УП-6	0,91	0,84...0,85
УП-7	0,90	0,70...0,75
УП-7 (партия отформована в РКК «Энергия»)	0,90	0,83...0,84

### Определение удельного объемного сопротивления $\rho_v$ углепластиков

Определение  $\rho_v$  проводилось с помощью тераомметра Е6-13А в соответствии с ГОСТ [12] на пяти образцах.

Удельное объемное сопротивление для углепластиков составило:

- УП-1 —  $2,1 \cdot 10^5 \dots 2,7 \cdot 10^5$  Ом·см;
- УП-2 —  $1,9 \cdot 10^4 \dots 9,7 \cdot 10^4$  Ом·см;



- УП-3 —  $1,4 \cdot 10^4 \dots 7,2 \cdot 10^4$  Ом·см;
- УП-6 —  $2,8 \cdot 10^3 \dots 5,4 \cdot 10^3$  Ом·см;
- УП-7 —  $2,2 \cdot 10^4 \dots 5,7 \cdot 10^4$  Ом·см.

### Проведение исследования по газовыделению в вакууме

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ [13] на трех образцах на установке, представленной на рис. 4.



Рис. 4. Установка для исследования газовой выделению в вакууме: 1 — напускной вентиль; 2 — цеолитовый насос; 3 — вакуумная камера; 4 — средства измерения давления в камере; 5 — пульт управления средствами откачки; 6 — турбомолекулярный насос; 7 — система охлаждения

Условия кондиционирования образцов:  
 относительная влажность  $(55 \pm 5)\%$ ;  
 температура  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ .  
 Продолжительность кондиционирования: 100 ч.  
 Условия испытаний:  
 давление  $P \leq 110^{-5}$  мм рт. ст.;  
 температура нагрева образцов  $(125 \pm 2)^\circ\text{C}$ ;  
 температура конденсирующейся пластины  $(25 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ ;  
 продолжительность испытания 24 ч.

Результаты испытаний представлены в табл. 10.

Исследованные углепластики удовлетворяют требованиям [14] по потере массы ( $<1\%$  по ГОСТ [13]); количеству летучих конденсирующихся веществ ( $<0,1\%$  по ГОСТ [13]); влагосодержанию ( $<1\%$ ).

Таблица 10

### Результаты испытаний при температуре нагрева образцов углепластиков $125^\circ\text{C}$

Марка углепластика	Характеристики газовой выделения		
	ПМ, %	Количество ЛКВ, %	Влагосодержание, %
УП-1	0,81	$<0,01$	0,5
УП-6	0,41	0,01	0,24
УП-7	0,29	$<0,01$	0,22

Примечание. ЛКВ — летучие конденсирующиеся вещества, ПМ — потеря массы.

### Определение степени негерметичности по гелиево-воздушной смеси при нормальной и повышенных температурах

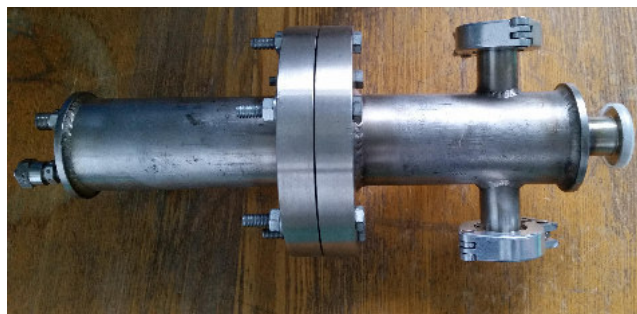
Исследование образцов углепластиков проводилось с использованием специально разработанной установки, позволяющей определить степень негерметичности при температурах  $20, 50$  и  $90^\circ\text{C}$  и перепаде давления на образцах  $1,3 \text{ кгс/см}^2$  с. Контрольный газ —  $5\%$ -ная гелиево-воздушная смесь.

Измерения степени негерметичности образцов по гелиево-воздушной смеси проводили по ОСТ [15] с использованием гелиевого масс-спектрометрического течеискателя *Leybold PhoениXL300i dry*, камеры с установленным в ней образцом и температурного шкафа ВШ-0,035.

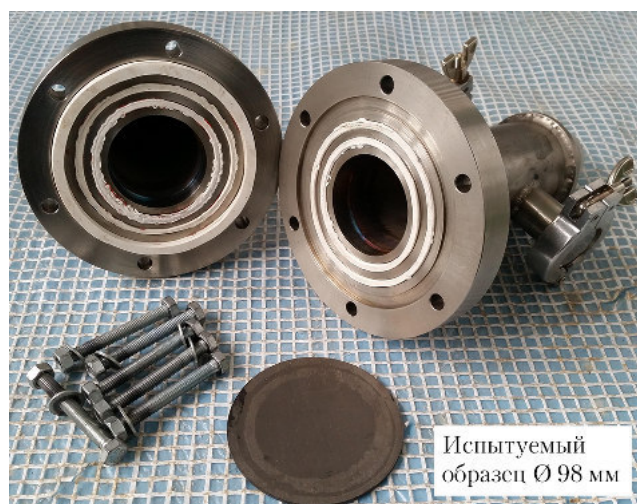
Специальная камера для измерения степени негерметичности представлена на рис. 5.

Данный метод контроля заключается в том, что испытуемый образец материала герметично устанавливается между двумя камерами. В первой камере создается давление контрольного газа, во второй, в свою очередь подключенной к регистрирующему устройству (течеискателю), — вакуум. Течеискатель регистрирует повышение концентрации контрольного газа, который прошел сквозь образец, и выводит на экран величину газопроницаемости активной площади испытуемого материала. Кроме того, установка, изготовленная из теплопроводящего материала, может быть помещена в термощкаф для проверки величины степени негерметичности при различных повышенных температурах. Идея данных испытаний заключается в имитации факторов, воздействующих на изделия (в частности, на возвращаемый аппарат), изготовленные из испытуемого материала, как в космическом пространстве, так и при температурных нагрузках при спуске с орбиты. Требование технического задания по ГЗОО — не более

5 л·мкм рт. ст./с. Результаты испытаний по определению степени негерметичности образцов углепластиков в пересчете на поверхность ГЗОО с площадью 50 м<sup>2</sup> представлены в табл. 11. Испытания проводились на трех образцах при одной температуре.



а)



б)

Рис. 5. Специальная камера для измерения степени негерметичности: а – в собранном виде; б – в разобранном виде

Таблица 11

#### Результаты испытаний по определению степени негерметичности образцов углепластиков

Марка углепластика	Оценка негерметичности, л·мкм рт. ст./с		
	при 20 °С	при 50 °С	при 90 °С
УП-1	0,029...0,050	0,026...0,024	0,003...0,025
УП-6	0,0179	0,0611	0,0047
УП-7	0,177	3,540	14,160

Образцы углепластиков (за исключением УП-7), исследованных при температурах 20, 50, 90 °С, имеют степень негерметичности, сопоставимую с показателем алюминиевого сплава АМг6. Более обоснованный вывод о возможности применения исследованных углепластиков для изготовления гермозамкнутых обитаемых отсеков может быть сделан только после изготовления и проведения комплексных испытаний масштабного

макета ГЗОО с люками, гермовводами и другими конструктивными соединениями.

Исследования показали, что образцы углепластиков обладают приемлемой низкой проницаемостью по отношению к воздуху и гелию. Тем не менее, при продолжении работ по созданию таких перспективных отсеков с корпусами из углепластиков следует уделить особое внимание исследованиям герметичности клеевых соединений деталей из углепластика, а также конструктивных элементов корпуса, в которых основной материал – углепластик – сопрягается с металлическими конструкциями люков, иллюминаторов, электрических и пневматических гермовводов, посадочным шпангоутом стыковочного агрегата. Также необходимо провести исследования по сохранению низкой газопроницаемости после воздействия эксплуатационных нагрузок, имитирующих полный жизненный цикл изделий.

Измеренные значения удельного газовыделения образцов углепластиков в вакууме позволяют получить для корпусов крупногабаритных обитаемых отсеков оптимистические оценки суммарного газовыделения, значения которых соответствуют возможностям откачных систем имеющихся в настоящее время вакуумных камер, используемых для проведения испытаний на герметичность отсеков и пневмогидросистем космических аппаратов с использованием пробного газа гелия и гелиевых масс-спектрометрических теческателей.

Также проводились исследования зависимости изменения температуры (20, 90, 150, 180 °С) образцов УП-1 от времени при циклическом нагреве (10 циклов). На основании измерений можно сделать вывод о том, что при циклическом нагреве негерметичность образцов УП-1 не изменилась.

#### Оценка токсикологической безопасности и микробиологической стойкости

Испытания по оценке токсикологической безопасности и микробиологической стойкости проводились в Институте медико-биологических проблем РАН.

Исследование материалов по параметрам безопасного применения в герметичных замкнутых обитаемых отсеках для оценки токсикологической безопасности и микробиологической стойкости проводились в соответствии с требованиями [14–17]. Предлагаемые температурные условия эксплуатации внутри гермозамкнутых обитаемых отсеков:

40 °С — длительно; 90 °С — в течение 1 ч (токсикологическая безопасность). Микробиологическая стойкость определялась при температуре (29±2) °С; допустимая насыщенность материала при 40 °С — не менее 2,5 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Грибостойкость — не более 3 баллов. Результаты исследований по токсикологической безопасности и микробиологической стойкости представлены в табл. 12. Токсикологическая безопасность исследовалась на трех образцах, микробиологическая стойкость — на пяти образцах.

Таблица 12

#### Результаты исследований по токсикологической безопасности и микробиологической стойкости

Марка углепластиков	Допустимая насыщенность материала при 40 °С, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	Грибостойкость, баллы
УП-1	0,7	2–3
УП-1 (опытная партия)	2,5	4
УП-4	0,75	—
УП-6	2,5	2–3
УП-7	5,0	3–4

По допустимой насыщенности материала удовлетворяют требованиям углепластики УП-1 (опытная партия), УП-6 и УП-7.

По микробиологической стойкости удовлетворяют требованиям углепластики УП-1 и УП-6.

#### Оценка пожарной безопасности

Исследования углепластиков по параметрам безопасного применения в ГЗОО для оценки их пожарной опасности проводились в соответствии с требованиями методики, разработанной РКК «Энергия».

Экспериментальное определение характеристик пожарной опасности материала при температуре 40 °С и расчетное определение характеристик пожарной опасности при температурах 90, 150 °С проводились в МЧС России. Для ГЗОО предел горения по концентрации кислорода  $C_{пр}$  должен быть не менее 40%. Пожарная безопасность определялась на 10 образцах каждого материала.

Предел горения по концентрации кислорода для углепластиков составил:

- УП-1 (опытная партия) — >40,0%;
- УП-1 — 20,5%;
- УП-6 — 20,5%;
- УП-7 — 22,5%.

Все образцы углепластиков являются горючими ( $C_{пр} < 40\%$ ) и не могут быть

рекомендованы для изготовления корпусов ГЗОО без доработки рецептуры, либо без применения специального негорючего покрытия.

#### Выводы

Проведенный комплекс исследований позволил получить основные физико-механические характеристики углепластиков для проектирования перспективных высоконагруженных конструкций космической техники.

Исследованные углепластики серии ПСБ могут быть использованы для изготовления конструкций космической техники, эксплуатирующихся при повышенных температурах.

Образцы углепластиков, за исключением углепластиков КМКУЗ.150, 22500/НИИКАМ-РС, исследованных при температурах 20, 50, 90 °С, имеют негерметичность, сопоставимую с алюминиевым сплавом АМгб. Более обоснованный вывод о возможности применения исследованных углепластиков для изготовления гермозамкнутых обитаемых отсеков может быть сделан только после изготовления и проведения комплексных испытаний масштабного макета отсека с люками, гермовводами и другими конструктивными соединениями, а также после исследований сохраняемости необходимой герметичности после воздействия эксплуатационных нагрузок.

Выполненные исследования показали отсутствие на сегодняшний день композиционного материала, удовлетворяющего всем требованиям, предъявленным к ГЗОО. В связи с этим требуется дальнейшее продолжение НИР по разработке и внедрению таких материалов.

#### Список литературы

1. Авиационные материалы. Справочник / Под ред. Туманова А.Т., Гуняева Г.М. М.: ОНТИ, 1977. 167 с.
2. ГОСТ 25.601-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М.: Стандартинформ, 2005. 13 с.
3. ГОСТ 25.602-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах. М.: Стандартинформ, 2005. 17 с.

4. ГОСТ 32658-2014. Композиты полимерные. Определение механических характеристик при сдвиге в плоскости армирования методом испытания на растяжение под углом  $\pm 45$  град. М.: Стандартиформ, 2014. 15 с.

5. ГОСТ 33498-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на смятие. М.: Стандартиформ, 2016. 20 с.

6. ГОСТ 4647-2015. Пластмассы. Методы определения ударной вязкости по Шарпи. М.: Стандартиформ, 2015. 23 с.

7. ГОСТ Р 56815-2015. Композиты полимерные. Метод определения удельной работы расслоения в условиях отрыва GIC. М.: Стандартиформ, 2016. 24 с.

8. ГОСТ 707699. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. 27 с.

9. ГОСТ Р 54253-2010. Материалы углеродные. Метод определения температурного коэффициента линейного расширения. М.: Стандартиформ, 2013. 10 с.

10. ГОСТ Р 55134-2012. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). М.: Стандартиформ, 2013. 27 с.

11. ОСТ 92-0909-69. Материалы и покрытия специального назначения. Методика измерения тепловых радиационных характеристик. Разработчик РКК «Энергия». М.: База данных государственных и отраслевых стандартов, 1969. 24 с.

12. ГОСТ 6433.2-71. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрического сопротивления при постоянном напряжении. М.: Издательство стандартов, 1994. 27 с.

13. ГОСТ Р50109-92. Материалы неметаллические. Метод испытаний на потерю массы и содержания летучих конденсирующихся веществ при температурах испытаний 125 и 50 °С. М.: Издательство стандартов, 1992. 11 с.

14. Методические указания по санитарно-химическому и токсикологическому исследованию неметаллических материалов, предназначенных для оборудования герметически замкнутых объемов, утвержденные МЗ СССР 03.09.1982 г. М.: Министерство здравоохранения СССР, 1981. 103 с.

15. ОСТ 92-1527-89. Метод испытаний на герметичность с применением масс-спектрометрических течеискателей. М.: Издательство стандартов, 1989. 139 с.

16. ГОСТ Р 50804-95. Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате. М.: ИПК Издательство стандартов, 1995. 121 с.

17. ГОСТ 9.049-91. Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов. М.: Издательство стандартов, 1994. 19 с.

Статья поступила в редакцию 06.12.2017 г.

## Reference

1. *Aviatsionnye materialy. Spravochnik* [Aviation materials. Handbook]. Ed. Tumanov A.T., Gulyaev G.M. Moscow, ONTI publ., 1977. 167 p.

2. *GOST 25.601-80. Design calculation and strength testings. Methods of mechanical testing of polymeric composite materials test for tensile properties on plane specimens at normal, elevated and low temperatures.* Moscow, Standartinform publ., 2005. 13 p.

3. *GOST 25.602-80. Design calculation and strength testings. Methods of mechanical testing of polymeric composite materials. Test for compression properties at normal, elevated and low temperatures.* Moscow, Standartinform publ., 2005. 17 p.

4. *GOST 32658-2014. Polymer composites. Determination of mechanical properties in the plane of shear reinforcement by a tensile test at an angle of  $\pm 45$  degree.* Moscow, Standartinform publ., 2014. 15 p.

5. *GOST 33498-2015. Polymer composites. Test method for collapse.* Moscow, Standartinform publ., 2016. 20 p.

6. *GOST 4647-2015. Plastics. Method for determination of Charpy impact strength.* Moscow, Standartinform publ., 2015. 23 p.

7. *GOST Р 56815-2015. Polymer composites. Method for determination specific work of exfoliation in tearing off conditions GIC.* Moscow, Standartinform publ., 2016. 24 p.

8. *GOST 707699. Building materials and products. Method of determination of steady-state thermal conductivity and thermal resistance.* Moscow, Gosstroy Rossii, GUP TsPP publ., 2000. 27 p.

9. GOST P 54253-2010. Carbon materials. Test method for linear thermal expansion coefficient. Moscow, Standartinform publ., 2013. 10 p.

10. GOST P 55134-2012. Plastics. Differential scanning calorimetry (DSC). Moscow, Standartinform publ., 2013. 27 p.

11. OST 92-0909-69. Materialy i pokrytiya spetsial'nogo naznacheniya. Metodika izmereniya teplovykh radiatsionnykh kharakteristik. Razrabotchik RKK «Energiya» [Special-purpose materials and coatings. Procedure for measuring thermal radiation properties. Developed by RSC Energia]. Moscow, Database of state and industry standards publ., 1969. 24 p.

12. GOST 6433.2-71. Solid electrical insulating materials. Methods for evaluation of electrical resistances at d. c. Voltages. Moscow, Izdatel'stvo standartov publ., 1994. 27 p.

13. GOST P50109-92. Nonmetallic materials. Test method for mass loss and content of volatile condensable materials in a vacuum-thermal environment. Moscow, Izdatel'stvo standartov publ., 1992. 11 p.

14. Metodicheskie ukazaniya po sanitarno-khimicheskomu i toksikologicheskomu issledovaniyu nemetallicheskih materialov, prednaznachennykh dlya oborudovaniya germeticheski zamknutykh ob"emov, utverzhdennye MZ SSSR 03.09.1982 [Guidelines for sanitary, chemical and toxicology study of non-metallic materials intended for equipment in air-tight volumes approved by the USSR Ministry of Health on 03.09.1982]. Moscow, Ministerstvo zdravookhraneniya SSSR publ., 1981. 103 p.

15. OST 92-1527-89. Metod ispytaniy na germetichnost' s primeneniem mass-spektricheskikh techeiskatelei [Leak test method using mass-spectrometer leak testers]. Moscow, Izdatel'stvo standartov publ., 1989. 139 p.

16. GOST P 50804-95. Cosmonaut's habitable environments on board of manned spacecraft. General medicotechnical requirements. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov publ., 1995. 121 p.

17. GOST 9.049-91. Unified system of corrosion and ageing protection. Polymer materials and their components. Methods of laboratory tests for mould resistance. Moscow, Izdatel'stvo standartov publ., 1994. 19 p.