

УДК 53.093:67.017

В.О. Старцев¹, А.Ю. Махоньков¹, Е.А. Котова¹**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ВЛАГОСТОЙКОСТЬ
ПКМ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-49-55

Исследовано влияние повреждений при ударе падающим грузом и экспонирования в четырех климатических зонах на коэффициент диффузии влаги, предельное влагонасыщение, прочностные характеристики перспективных авиационных стекло- и углепластиков. Показано, что при таких воздействиях показатели влагопереноса обладают большей чувствительностью: средние значения коэффициента диффузии уменьшаются на 35%, а средние значения разрушающих напряжений – на 5,5%.

Ключевые слова: климатическое старение, предел прочности при сжатии, ударные повреждения, влагоперенос.

The influence of drop-weight impact on moisture diffusion coefficient, ultimate moisture saturation and compression strength properties of next-generation GFRPs and CFRPs exposed to four different climatic regions was investigated. The moisture transfer properties are more sensitive to the damage induced by drop-weight impact: compression strength is decreased by 5,5% average and moisture diffusion coefficient is decreased by 35 % average.

Keywords: weathering, ultimate compressive strength, drop-weight impact, moisture diffusion.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Широкое применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиастроении усилило интерес к оценке повреждений обшивки и элементов внешнего контура самолетов и вертолетов, вызванных механическими ударными нагрузками [1–5]. Для получения количественной информации о воздействии ударов широко используется метод нанесения калиброванных ударных повреждений образцов ПКМ свободно падающим грузом, регламентированный ASTM D7136 [6]. По стандарту ASTM D7137 рекомендовано измерять разрушающее напряжение при сжатии после удара [7]. Примеры выполненных исследований показывают диапазон изменения прочностных характеристик образцов ПКМ после нанесения калиброванных ударов, влияние состава и схем армирования и других особенностей ПКМ [8–12].

В приведенных примерах [8–12] исследовано влияние предварительного увлажнения на разрушение ПКМ с различными энергиями удара. Не меньший интерес представляет оценка влияния ударных повреждений на характеристики влагопереноса ПКМ. Поэтому в данной работе кроме обычно измеряемого разрушающего напряжения при сжатии после удара исследовано влияние энергии удара на коэффициент диффузии влаги и предельное влагонасыщение перспективных авиационных стекло- и углепластиков.

Материалы и методы

Для исследований выбраны ПКМ авиационного назначения с укладкой слоев [+45°/-45°/0°/90°] – табл. 1 [13, 14]. Изучены образцы ПКМ в исходном состоянии и после 6 мес экспонирования в натуральных климатических условиях Геленджика, Москвы, Сочи, Якутска по аналогии с работой [15].

Механические повреждения образцов ПКМ создавались ударом свободно падающего груза с наконечником полусферической формы по ASTM D7136 [8]. Использовали образцы в виде прямоугольных пластин размером 150×100 мм. Ударное повреждение оценивали по размеру отпечатка и типу повреждения образца. Зона повреждения в результате удара падающим грузом располагалась в центре образца, чтобы локальные напряжения по краям и в центре образца не накладывались друг на друга во время формирования ударного повреждения.

В соответствии с рекомендацией стандарта ASTM D7136 для каждой марки ПКМ наносили калиброванный удар с энергией E_a , зависящей от толщины образца h :

$$E_a = C_E \cdot h, \quad (1)$$

где коэффициент нормирования энергии удара на толщину образца C_E составляет 6,7 Дж/мм; h – толщина образца, мм.

В табл. 2 представлены изображения повреждений образцов ПКМ на лицевой и оборотной

Таблица 1

Перечень и состав исследованных полимерных композиционных материалов

Материал	Марка	Связующее	Ткань
Стеклопластик	КМКС-2м.120.Т10.37	Пленочное связующее на основе клеев ВК-36, ВК-51	Стеклоткань Т-10-80
Углепластик	КМКУ-2м.120.Э0,1.45	Пленочное связующее на основе клеев ВК-36, ВК-51	Углеродная лента Элур П
Углепластик	ВКУ-27л	Расплавное связующее на основе циановых эфиров ВСТ-1208	Равнопрочная углеродная ткань Porcher, арт. 14535
Углепластик	ВКУ-29	Расплавное связующее на основе циановых эфиров ВСЭ-1212	Однонаправленная углеродная ткань Porcher, арт. 4510
Углепластик	ВКУ-39	Расплавное связующее на основе циановых эфиров ВСЭ-1212	Равнопрочная углеродная ткань Porcher, арт. 3692

сторонах после ударов с энергией E_a . Наибольшие повреждения в виде сквозных разрушений обнаружены на образце из углепластика марки КМКУ-2м.120.Э0,1.45. Для других марок ПКМ на лицевой стороне углубления от удара падающего груза не превысили 0,2–0,5 мм. На оборотной стороне этих ПКМ после удара образовались расщепления и трещины преимущественно вдоль направлений $[+45^\circ/-45^\circ]$ размером до 20–30 мм.

Результаты и обсуждение

Влияние ударных воздействий определено при сравнении предела прочности и разрушающего напряжения при сжатии по ГОСТ 25.602–80 и ASTM D7137 [7] в исходном состоянии и после удара с энергией E_a . Предел прочности при сжатии образцов с ударными повреждениями существенно снижается (табл. 3) по аналогии с данными работ [8–12].

Для определения характеристик влагопереноса образцы исходных и поврежденных ПКМ выдерживали в эксикаторе при температуре 60°C и относительной влажности $98\pm 2\%$ в течение 30–40 сут. Моделирование влагопереноса проводили по варианту одномерного закона Фика с постоянными граничными условиями [16]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_F \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}, \quad -\frac{l}{2} < z < +\frac{l}{2}, \quad t > 0;$$

$$c(z, t)|_{t=0} = 0, \quad c\left(-\frac{l}{2}, t\right) = c\left(+\frac{l}{2}, t\right) = c_0; \quad (2)$$

$$\omega(t) = \int_{-l/2}^{+l/2} c(z, t) dz,$$

где c – концентрация влаги в единице объема образца; c_0 – значение концентрации влаги при $t \rightarrow \infty$; z – координата, вдоль которой диффундирует влага, см; l – характерная толщина образца, см; t – продолжительность влагонасыщения, сут; D_F – коэффициент диффузии Фика, $\text{см}^2/\text{сут}$; $\omega(t)$ – влагонасыщение модельного отрезка длиной l в момент времени t .

Влагонасыщение при диффузии Фика w_F в одномерном приближении аппроксимируется соотношением [16]

$$w_F = w_\infty \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-\pi^2 (2n-1)^2 \frac{D_F t}{\lambda^2}\right] \right), \quad (3)$$

где $w_\infty = (M_\infty - M_0)/M_0$ – предельное влагонасыщение; M_0 – масса образца в начальный момент времени; M_∞ – масса образца, полученная за время $t \rightarrow \infty$; n – натуральное число; D_F – коэффициент диффузии Фика; длина диффузионного пути λ определена по формуле:

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{L^2} + \frac{1}{W^2} + \frac{1}{h^2}, \quad (4)$$

где L , W , h – геометрические размеры образца, мм.

Расчеты показали (табл. 4–6), что влагоперенос в исследованных ПКМ удовлетворительно моделируется одномерным законом Фика по варианту (3). Средний коэффициент детерминированности модели R^2 составляет 0,989. Относительные ошибки при определении коэффициента диффузии с учетом разброса данных для параллельных образцов для разных марок не превысили 10%. Относительные ошибки при определении предельного влагонасыщения изменяются в пределах 1–2%.

Результаты моделирования, представленные в табл. 4, позволяют оценить влияние 6 мес экспонирования в открытых климатических условиях Геленджика, Москвы, Сочи, Якутска на показатель влагопереноса ПКМ без нанесения механических ударов.

В исходном состоянии для пластин ПКМ размером 150×100 мм коэффициент диффузии влаги имеет минимальное значение $D_F = 0,90$ $\text{мм}^2/\text{сут}$ для стеклопластика марки КМКС-2м.120.Т10.37. Для углепластиков этот показатель составляет 1,2–2,9 $\text{мм}^2/\text{сут}$. Предельное влагонасыщение w_{max} образцов в исходном состоянии для пяти марок ПКМ находится в пределах 0,56–0,71%.

Таблица 2

Вид лицевой и оборотной сторон образцов из полимерных композиционных материалов после ударов с энергией E_d

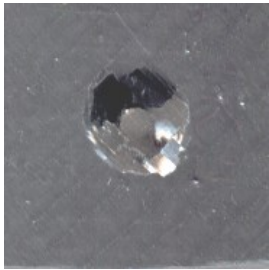
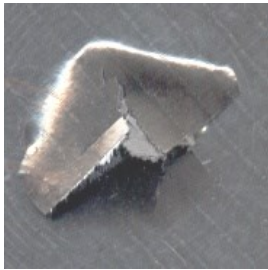
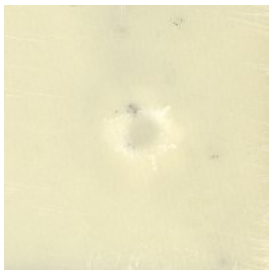

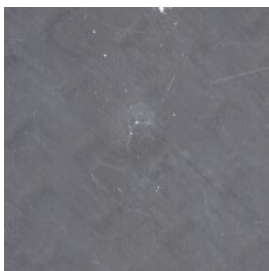
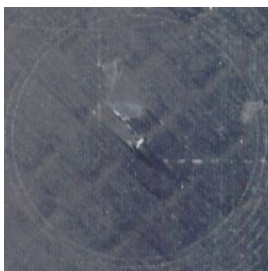



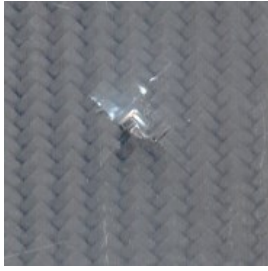
Материал	Вид лицевой стороны	Вид оборотной стороны
Углепластик КМКУ-2м.120.Э0,1.45		
Стеклопластик КМКС-2м.120.Т10.37		
Углепластик ВКУ-27л		
Углепластик ВКУ-29		
Углепластик ВКУ-39		

Таблица 3

**Результаты испытаний на удар падающим грузом образцов
из полимерных композиционных материалов**

Материал	Толщина образца, мм	Энергия удара, Дж	Максимальная контактная сила, кН	Предел прочности при сжатии в исходном состоянии	Разрушающее напряжение при сжатии после удара
				МПа	
КМКУ-2м.120.Э0,1.45	5,38	36,0	6,97	458	195
КМКС-2м.120.Т10.37	3,76	25,2	6,81	408	208
ВКУ-27л	5,07	33,9	11,1	320	175
ВКУ-39	4,95	33,1	9,75	640	290
ВКУ-29	5,81	38,9	13,8	471	240

Таблица 4

Влияние 6 мес экспонирования в четырех климатических зонах на коэффициент диффузии влаги D_F и предельное влагонасыщение w_{max} полимерных композиционных материалов для образцов размером 150×100 мм без нанесения механических ударов

Материал	Место экспонирования	Продолжительность экспозиции, мес	D_F , мм ² /сут	w_{max} , %
Углепластик ВКУ-27л	В исходном состоянии		2,9	0,71
	Геленджик Москва Сочи Якутск	6	2,6	0,71
			2,9	0,63
			2,7	0,68
			2,2	0,69
Углепластик ВКУ-29	В исходном состоянии		2,1	0,68
	Геленджик Москва Сочи Якутск	6	1,7	0,50
			2,0	0,63
			1,6	0,68
			1,6	0,72
Углепластик ВКУ-39	В исходном состоянии		1,2	0,57
	Геленджик Москва Сочи Якутск	6	1,2	0,59
			1,5	0,48
			1,5	0,44
			1,2	0,56
Стеклопластик КМКС-2м.120.Т10.37	В исходном состоянии		0,90	0,69
	Геленджик Москва Сочи Якутск	6	0,78	0,62
			0,86	0,65
			0,71	0,65
			0,79	0,70
Углепластик КМКУ-2м.120.Э0,1.45	В исходном состоянии		1,8	0,56
	Геленджик Москва Сочи Якутск	6	1,6	0,55
			1,8	0,56
			1,6	0,55
			1,5	0,65

Таблица 5

Влияние 6 мес экспонирования в четырех климатических зонах на коэффициент диффузии влаги D_F и предельное влагонасыщение w_{\max} полимерных композиционных материалов для образцов размером 150×100 мм после нанесения механического удара

Материал	Место экспонирования	Продолжительность экспозиции, мес	D_F , мм ² /сут	w_{\max} , %
Углепластик ВКУ-27л	В исходном состоянии		4,6	0,74
	Геленджик	6	3,4	0,78
	Москва		3,6	0,70
	Сочи		2,6	0,78
	Якутск		2,5	0,65
Углепластик ВКУ-29	В исходном состоянии		1,4	0,75
	Геленджик	6	2,0	0,50
	Москва		2,1	0,70
	Сочи		2,0	0,64
	Якутск		1,5	0,80
Углепластик ВКУ-39	В исходном состоянии		1,5	0,56
	Геленджик	6	1,2	0,62
	Москва		1,5	0,50
	Сочи		1,2	0,52
	Якутск		1,4	0,57
Стеклопластик КМКС-2м.120.Т10.37	В исходном состоянии		1,1	0,65
	Геленджик	6	0,90	0,68
	Москва		0,71	0,74
	Сочи		0,60	0,72
	Якутск		0,80	0,71
Углепластик КМКУ-2м.120.Э0,1.45	В исходном состоянии		2,2	0,72
	Геленджик	6	3,2	0,51
	Москва		1,7	0,74
	Сочи		2,1	0,72
	Якутск		2,5	0,62

Таблица 6

Влияние 6 мес экспонирования в четырех климатических зонах на коэффициент диффузии влаги D_F и предельное влагонасыщение w_{\max} полимерных композиционных материалов для образцов размером 150×100 мм после нанесения механического удара и испытаний на сжатие

Материал	Место экспонирования	Продолжительность экспозиции, мес	D_F , мм ² /сут	w_{\max} , %
Углепластик ВКУ-27л	В исходном состоянии		4,5	0,87
	Геленджик	6	4,8	0,77
	Москва		4,3	0,67
	Сочи		2,7	0,81
	Якутск		2,9	0,67
Углепластик ВКУ-29	В исходном состоянии		7,6	0,56
	Геленджик	6	2,7	0,78
	Москва		4,2	0,63
	Сочи		3,2	0,72
	Якутск		3,8	0,70
Углепластик ВКУ-39	В исходном состоянии		3,2	0,53
	Геленджик	6	2,6	0,54
	Москва		2,2	0,51
	Сочи		1,4	0,70
	Якутск		2,3	0,57
Стеклопластик КМКС-2м.120.Т10.37	В исходном состоянии		1,1	0,75
	Геленджик	6	1,1	0,60
	Москва		1,1	0,81
	Сочи		1,1	0,91
	Якутск		1,1	0,63
Углепластик КМКУ-2м.120.Э0,1.45	В исходном состоянии		4,6	0,61
	Геленджик	6	4,0	0,68
	Москва		3,5	0,58
	Сочи		2,2	0,83
	Якутск		3,6	0,59

Таблица 7

Влияние механического удара и сжатия после удара на средние значения коэффициента диффузии влаги D_F и предельное влагонасыщение w_{max} полимерных композиционных материалов в исходном состоянии и после 6 мес экспозиции в четырех климатических зонах

Место и продолжительность натурной экспозиции образцов		Значения показателей					
		без нанесения удара		после нанесения удара		после удара и сжатия	
		D_F , мм ² /сут	w_{max} , %	D_F , мм ² /сут	w_{max} , %	D_F , мм ² /сут	w_{max} , %
В исходном состоянии		1,8	0,64	2,2	0,68	4,1	0,66
После 6 мес натурной экспозиции в городах	Геленджик	1,6	0,59	1,9	0,65	3,0	0,66
	Москва	1,8	0,59	1,9	0,68	3,1	0,64
	Сочи	1,6	0,60	1,7	0,68	2,1	0,69
	Якутск	1,5	0,66	1,7	0,67	2,7	0,63
	Среднее значение	1,6	0,61	1,8	0,67	2,7	0,68

Таблица 8

Влияние 6 мес экспозиции в четырех климатических зонах на среднее значение разрушающего напряжения при сжатии после удара образцов из полимерных композиционных материалов с учетом влагонасыщения

Место экспонирования	Среднее разрушающее напряжение при сжатии после удара*, МПа		
	удар	влагонасыщение+удар	удар+влагонасыщение
Геленджик	215	200	202
Москва	206	207	190
Сочи	217	202	192
Якутск	217	203	195
Среднее	214	203	195

*Среднее значение разрушающего напряжения при сжатии после удара для образцов пяти марок ПКМ без климатической экспозиции составляет 222 МПа.

После 6 мес экспонирования в Москве средняя величина коэффициента диффузии влаги для пяти марок ПКМ остается на уровне исходного значения (~1,8 мм²/сут), после экспонирования в Геленджике, Сочи, Якутске этот показатель имеет тенденцию к снижению до 1,5 мм²/сут. Подобное уменьшение коэффициента диффузии наблюдалось для стеклопластиков, экспонированных в условиях различных климатических зон [10]. Максимальное изменение коэффициента диффузии влаги после 6 мес натурного экспонирования не превышает 17% от исходного значения.

После 6 мес экспонирования в четырех климатических зонах средняя величина предельного влагонасыщения несущественно изменяется в пределах 0,59–0,66% по сравнению с исходным значением (~0,64%). Максимальное изменение предельного влагонасыщения после 6 мес натурного экспонирования не превышает 8% от исходного значения.

В табл. 5 и 6 представлены результаты аналогичного моделирования показателей влагопереноса в двух вариантах: после нанесения механического удара и испытаний на сжатие после удара.

Для получения общих выводов о влиянии механических ударов на показатели влагопереноса ПКМ в табл. 6 представлены усредненные значения коэффициента диффузии влаги и предельного влагонасыще-

ния пяти марок ПКМ в исходном состоянии и после 6 мес экспозиции в четырех климатических зонах.

Оказалось (табл. 7), что в исходном состоянии для пластин ПКМ размером 150×100 мм с нанесенным механическим ударом с энергией E_a коэффициент диффузии влаги D_F для пяти марок ПКМ увеличился в среднем с 1,8 до 2,2 мм²/сут, т. е. на 22%; предельное влагонасыщение при этом возросло несущественно – с 0,64 до 0,68%, т. е. на 6%.

После 6 мес экспонирования средняя величина коэффициента диффузии влаги для образцов ПКМ с нанесенным ударом проявляет тенденцию к уменьшению по сравнению с неповрежденными образцами – с 2,2 до 1,7 мм²/сут, т. е. на 23%. Предельное влагонасыщение для этого типа воздействия практически не изменяется.

После нанесения механического удара с энергией E_a и механических испытаний на сжатие после удара коэффициент диффузии влаги для пяти марок ПКМ увеличился в среднем на 128% (в 2,3 раза). Предельное влагонасыщение изменилось незначительно – не более 5%.

В результате 6 мес экспонирования средняя величина D_F уменьшилась на 35% (с 4,1 до 2,7 мм²/сут) при неизменном предельном влагонасыщении (см. табл. 7).

Для оценки влияния 6 мес экспонирования в открытых климатических условиях выполнены измерения предела прочности при сжатии по ГОСТ 25.602–80. Использовали образцы без нанесения дополнительных ударных повреждений. Все марки ПКМ оказались стабильными к такому кратковременному климатическому воздействию. Уменьшение показателей предела прочности при сжатии не превысило 1–3% от исходных значений, указанных в табл. 3.

Отметим (табл. 8), что среднее значение разрушающего напряжения при сжатии после удара пяти марок ПКМ также изменилось незначительно. Этот показатель уменьшился с 222 МПа в исходном состоянии до 214 МПа после 6 мес экспонирования в четырех климатических зонах, т. е. всего на 4%. Таким образом, чувствительность разрушающего напряжения при сжатии после удара к климатическому экспонированию в течение 6 мес оказалась в 8,8 раза меньше, чем средняя величина коэффициента диффузии влаги.

Заключение

Коэффициент диффузии влаги является чувствительным индикатором к повреждениям образцов ПКМ калиброванными механическими ударами по ASTM D7136. Этот показатель для образцов пяти марок ПКМ возрастает более чем на 20%.

После выполнения механических испытаний на сжатие после удара коэффициент диффузии влаги возрастает в 2,3 раза по сравнению с исходным состоянием.

Экспонирование в течение 6 мес в открытых климатических условиях Геленджика, Москвы, Сочи, Якутска способствует уменьшению на 20–35% коэффициента диффузии влаги как для неповрежденных образцов, так и для образцов с механическими повреждениями.

После 6 мес экспонирования ПКМ в четырех климатических зонах изменение среднего значения коэффициента диффузии влаги для образцов, подвергнутых сжатию после удара, оказалось в 8,8 раз больше, чем среднее значение разрушающего напряжения при сжатии после удара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения //Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 19–26.
2. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ //Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.
3. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 412–423.
4. Титарева А.С., Кириллов В.Н., Старцев О.В. Поведение материалов в элементах конструкций авиационной техники, изготовленных с применением ПКМ и систем ЛКП в условиях умеренно теплого климата //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 81–85.
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
6. ASTM Standard D7136. Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. 2005.
7. ASTM Standard D7137. Standard Test Method for Compressive Residual Strength Properties of Damaged Polymer Matrix Composite Plates. ASTM International: West Conshohocken. 2012.
8. Berkettis K., Tzetzis D. The compression-after-impact strength of woven and non-crimp fabric reinforced composites subjected to long-term water immersion ageing //J. Materials Science. 2010. V. 45. №20. P. 5611–5623.
9. Imielinska K., Guillaumat L. The effect of water immersion ageing on low-velocity impact behaviour of woven aramid-glass fibre/epoxy composites //Composites Science and Technology. 2004. V. 64. №13–14. P. 2271–2278.
10. Saito H., Kimpara I. Damage evolution behavior of CFRP laminates under post-impact fatigue with water absorption environment //Composites Science and Technology. 2009. V. 69. №6. P. 847–855.
11. Aoki Y., Yamada K., Ishikawa T. Effect of hygrothermal condition on compression after impact strength of CFRP laminates //Composites Science and Technology. 2008. V. 68. №6. P. 1376–1383.
12. Park H., Kong C. A study on low velocity impact damage evaluation and repair technique of small aircraft composite structure //Composites: Part A. 2011. V. 42. №9. P. 1179–1188.
13. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 09 (viam-works.ru).
14. Субботин В.В., Гринев М.А. Опыт применения материалов производства ФГУП «ВИАМ» и PORCHER в конструкциях узлов и деталей авиационных силовых установок из полимерных композиционных материалов //Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. №5. С. 1–7.
15. Старцева Л.Т., Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диффузия влаги в стеклопластики после их климатического старения //Доклады академии наук. 2014. Т. 456. №3. С. 305–309.
16. Crank J. The mathematics of diffusion. Oxford: Clarendonpress. 1975. 414 p.