

УДК 678.067.5

К.С. Мишуров¹, С.М. Паярель¹, А.О. Курносов¹, И.И. Соколов¹, А.В. Егоров²

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТОВ
ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ
ИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-74-81

Рассмотрены основные свойства стеклотекстолитов – композиционных материалов-диэлектриков для печатных плат: температура стеклования, температурный коэффициент линейного расширения, предел прочности при изгибе, влагостойкость. Оценено влияние климатического воздействия (повышенная и пониженная температура среды, повышенная влажность воздуха, воздействие изменения температуры и солевого тумана) на показатели диэлектрической проницаемости стеклотекстолитов.

Ключевые слова: стеклотекстолит, стеклоткань, диэлектрик, печатная плата, полимерная матрица, композиционный материал.

K.S. Mishurov¹, S.M. Payarel¹, A.O. Kurnosov¹, I.I. Sokolov¹, A.V. Egorov²

**STUDY OF THE MAIN PROPERTIES OF GLASS FIBER LAMINATES
FOR PRINTED CIRCUIT BOARDS AND ASSESSMENT
OF THE INFLUENCE OF CLIMATIC INFLUENCES
ON THE INDICATORS OF THEIR DIELECTRIC CONSTANT**

In this paper, the main properties of glass fiber laminates – dielectric composite materials for printed circuit boards are considered: glass transition temperature, temperature coefficient of linear expansion, ultimate strength in bending, water resistance. The influence of climatic influences (increased ambient temperature, low ambient temperature, increased air humidity, the effect of temperature changes, the effect of salt fog) on the dielectric constant of glass fiber laminates has been evaluated.

Keywords: glass fiber laminates, fiberglass, dielectric, printed circuit board, polymer matrix, composite material.

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

²Акционерное общество «Электромаш» [Joint Stock Company «Electromash»]; e-mail: info@elektro-m.com

Введение

Печатные платы являются одним из основных элементов приборостроения в электронике, оказывая значительное влияние на основополагающие характеристики электрорадиоизделий наряду с электронными компонентами. Быстрые темпы развития микроэлектроники определяют новые требования к качеству и надежности печатных плат [1]. В качестве основного материала для их производства, как правило, применяют фольгированные медью листы из композиционных материалов-диэлектриков – слоистые прессованные стеклопластики (стеклотекстолиты) [2]. Одним из основных составляющих стеклотекстолитов является связующее (полимерная матрица), которое

определяет их технологические, термомеханические и упругопрочностные характеристики, био- и химическую стойкость и др. Именно связующее обеспечивает получение монолитного изделия с заданными размерами [3–5]. В качестве армирующих наполнителей для стеклотекстолитов печатных плат в основном применяются текстильные материалы из непрерывных стеклянных волокон. Стеклянные волокна на основе алюмоборосиликатного стекла (E-glass) удовлетворяют требованиям по диэлектрическим характеристикам [6, 7].

Как правило, одной из наиболее показательных характеристик диэлектриков считается температура стеклования, которая традиционно применяется для классификации диэлектриков для печатных плат. В производстве электронной аппаратуры в большинстве случаев используется поверхностный монтаж электронных компонентов, предполагающий процессы нагрева – например, пайку оплавлением. Кроме того, в процессе производства материал подвергается температурному воздействию при горячем прессовании многослойной печатной платы и облуживании. Одним из основных критериев выбора материала для печатных плат является способность устойчиво выдерживать температуру пайки, сохраняя свои геометрические размеры [8]. При этом важным свойством таких материалов является их линейное температурное расширение, напрямую влияющее на надежность печатной платы и характеризующееся температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). В материалах, армированных стекловолокном, значение ТКЛР отличается по соответствующим осям из-за направленности армирования. Стеклотекстолиты в длину и ширину ориентированы в плоскостях X и Y , а ось Z перпендикулярна этим плоскостям. Входящая в состав материала стеклоткань сдерживает расширение в направлении армирования, так как она имеет относительно небольшое собственное значение ТКЛР. Исходя из этого, незначительное температурное расширение по оси Z будет определять большую степень надежности и меньшие напряжения, оказываемые этим изменением линейных размеров стеклотекстолита, в том числе монтажных и межслойных отверстий [2]. Вместе с тем при эксплуатации и хранении стеклотекстолиты в составе электрорадиоизделий одновременно подвергаются не только воздействию повышенной и пониженной температур, но и повышенной влажности. Воздействие этих факторов на стеклотекстолиты может быть весьма разнообразным как по интенсивности, так и по продолжительности [9–14].

Основная механическая характеристика стеклотекстолитов для печатных плат – это предел прочности при изгибе, так как печатные платы в большинстве своем подвергаются воздействию изгибающих нагрузок. При эксплуатации печатных плат ключевой характеристикой является водостойкость, которая напрямую влияет на состояние электрической изоляции. Каждый слоистый материал в зависимости от конкретной молекулярной структуры поглощает определенное количество влаги. Это происходит не только при многократной влажной обработке (многочисленные «мокрые» процессы) в процессе производства печатных плат, но также в результате воздействия повседневных условий окружающей среды. Поглощенная влага может изменить характеристики материала и увеличить риск появления расслоений и пузырей при высокотемпературной обработке, подобной пайке оплавлением [2].

Одним из основных радиотехнических показателей качества стеклопластиков для печатных плат является диэлектрическая проницаемость. С увеличением частоты передачи сигналов возрастают требования к диэлектрическим свойствам материала. При высоких частотах передачи сигналов (>100 МГц) материал должен обладать низкими значениями диэлектрической проницаемости. В свою очередь величина диэлектрической проницаемости зависит от структуры, температуры, частоты приложенного

напряжения и имеет большое значение при передаче высокочастотных сигналов, так как влияет на уровень диэлектрических потерь [1, 15].

Материалы и методы

Для исследований выбраны стеклотекстолиты СТ 120 и СТ 155 на основе эпоксидных связующих и стеклотканей с температурами стеклования 120 и 155 °С соответственно. Показатели диэлектрической проницаемости (ϵ) этих стеклотекстолитов при частоте 1 МГц следующие:

Тип образца	СТ 120	СТ 155
Диэлектрическая проницаемость (ϵ)	4,81	4,70

Исследование основных свойств стеклотекстолитов и влияние климатического воздействия на характеристику диэлектрической проницаемости проводили в указанных далее условиях.

Температурный коэффициент линейного расширения. Исследования проводили по ГОСТ 26246.0–89 «Материалы электроизоляционные фольгированные для печатных плат. Методы испытаний» на испытательном оборудовании – дилатометре DIL 402С. Измерения ТКЛР осуществляли в трансверсальном направлении (ось Z) в диапазоне температур от –60 до +250 °С со скоростью нагрева 5 К/мин в динамической среде аргона при потоке 50 мл/мин.

Прочность при изгибе. Исследования проводили по ГОСТ 26246.0–89 «Материалы электроизоляционные фольгированные для печатных плат. Методы испытаний» на испытательной машине Zwick/Roell Z050 при температуре воздуха в помещении 20±5 °С и относительной влажности 50±10 %.

Водостойкость. Исследование проводили по ГОСТ 26246.0–89 «Материалы электроизоляционные фольгированные для печатных плат. Методы испытаний» в климатической камере Climats Excal 5413НА. Водопоглощение определяли при погружении образца материала в воду на 24 ч при температуре воздуха в помещении 20±5 °С и относительной влажности 60±10 %.

Повышенная температура среды. Экспозицию проводили в воздушном термостате при температуре 115±2 °С в течение 10, 1000 и 2000 ч.

Пониженная температуры среды. Испытываемые образцы размещали в камере «тепло-холод». После достижения температуры –60±2 °С образцы стеклотекстолита выдерживали в течение 2 ч. После окончания испытаний образцы выдерживали при температуре 23±2 °С и относительной влажности воздуха 50±10 % в течение 2 ч.

Повышенная влажность воздуха. Испытываемые образцы стеклотекстолита выдерживали в тепловлажностной камере при следующем циклическом режиме:

- температуру в камере повышали до 40±2 °С в течение 3 ч, относительная влажность при этом составляла не менее 95 %;
- температуру 40±2 °С поддерживали в течение 12±0,5 ч от начала цикла, относительная влажность при этом составляла 93±3 %;
- температуру понижали до 25±2 °С в течение 6 ч, относительная влажность при этом составляла не менее 95 %;
- поддерживали температуру 25±2 °С и относительную влажность не менее 95 % в течение 3 ч (до конца цикла).

Срок экспозиции в тепловлажностной камере составил 6 и 21 сут. После окончания испытаний образцы стеклотекстолита выдерживали при температуре 23±2 °С и относительной влажности воздуха 50±10 % в течение 6 ч.

Воздействие изменения температуры. Испытуемые образцы стеклотекстолита выдерживали в камере холода при температуре -60 ± 2 °С в течение 2 ч. Далее образцы переносили в камеру тепла, в которой заранее устанавливали температуру 115 ± 2 °С, образцы выдерживали при этой температуре в течение 2 ч. Цикл испытания повторяли трижды. Продолжительность выдержки образцов в камере холода и тепла отсчитывали с момента достижения заданной температуры воздуха в камере после загрузки образцов. Время переноса образцов из камеры холода в камеру тепла и обратно составляло < 5 мин. После окончания испытаний образцы выдерживали при температуре 23 ± 2 °С и относительной влажности воздуха 50 ± 10 % в течение 2 ч.

Воздействие солевого тумана. Образцы стеклотекстолита выдерживали в камере солевого тумана в течение 21 сут. После окончания испытаний образцы выдерживали при температуре 23 ± 2 °С и относительной влажности воздуха 50 ± 10 % в течение 2 ч.

Диэлектрическая проницаемость. Исследование проводили на векторном анализаторе электрических цепей ZVA50 в соответствии с ГОСТ 22372–77 «Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до $5 \cdot 10^6$ Гц».

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены значения ТКЛР для образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 в плоскости X. Показано, что материал СТ 120 имеет более высокие значения ТКЛР в сравнении с материалом СТ 155.

Таблица 1

Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) для диэлектриков на основе стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 в плоскости X

Температура, °С	Средние значения ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$, для стеклотекстолита	
	СТ 120	СТ 155
-60	12,4	12,1
-30	12,9	12,6
50	13,8	13,3
100	14,5	13,7
150	12,4	11,2
200	9,4	8,7
250	7,7	7,3

В табл. 2 представлены значения предела прочности при изгибе стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155. Установлено, что предел прочности при изгибе у образцов из стеклотекстолита СТ 120 на 36 % больше, чем у образцов из материала СТ 155.

Таблица 2

Предел прочности и модуль упругости при изгибе стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155

Свойства	Значения свойств для стеклотекстолита	
	СТ 120	СТ 155
Предел прочности при изгибе, МПа	490	360
Модуль упругости, ГПа	17	17

Установлено также, что водопоглощение образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 не превышает 1 %, что является допустимым значением для материалов, используемых для изготовления печатных плат:

Тип образца	СТ 120	СТ 155
Водопоглощение, %	0,81	0,98

В табл. 3 представлены значения диэлектрической проницаемости для образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 после экспозиции в воздушном термостате при температуре 115 ± 2 °С. Установлено, что после экспозиции в приведенных условиях в течение 10, 1000 и 2000 ч по результатам визуального осмотра расслаивания, вздутия и коробления образцов не обнаружено. В сравнении с исходными значениями показатель диэлектрической проницаемости после выдержки в течение 10 ч для образцов из стеклотекстолита СТ 120 снизился на 3 %, для образцов из стеклотекстолита СТ 155 – на 6 %; после выдержки в течение 1000 ч для образцов из стеклотекстолита СТ 120 – на 15 %, для образцов из стеклотекстолита СТ 155 – на 3 %; после выдержки в течение 2000 ч для образцов из стеклотекстолита СТ 120 – на 4 %, для образцов из стеклотекстолита СТ 155 повысился на 11 %.

Таблица 3

Диэлектрическая проницаемость (при частоте 1 МГц) образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 после экспозиции в воздушном термостате при температуре 115 ± 2 °С при разной продолжительности экспозиции

Тип образца	Диэлектрическая проницаемость			
	до экспозиции	после экспозиции в течение, ч		
		10	1000	2000
СТ 120	4,81	4,67	4,27	4,19
СТ 155	4,70	4,44	4,58	4,53

В табл. 4 представлены результаты испытаний диэлектрической проницаемости для образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 после экспозиции в камере «тепло-холод» при -60 ± 2 °С. Установлено, что после экспозиции в приведенных условиях в течение 2 ч по результатам визуального осмотра расслаивания, вздутия и коробления образцов не обнаружено. Показатель диэлектрической проницаемости для образцов из стеклотекстолита СТ 120 повысился на 4 %, для образцов из стеклотекстолита СТ 155 снизился на 2 % в сравнении с исходными значениями.

Таблица 4

Диэлектрическая проницаемость (при частоте 1 МГц) образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 после экспозиции в камере «тепло-холод» при -60 ± 2 °С в течение 2 ч

Тип образца	Диэлектрическая проницаемость	
	до экспозиции	после экспозиции
СТ 120	4,81	5,00
СТ 155	4,70	4,63

В табл. 5 представлены результаты испытаний диэлектрической проницаемости для образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 после экспозиции в тепловлажной камере по циклическому режиму. Установлено, что после экспозиции в приведенных условиях в течение 6 и 21 сут по результатам визуального осмотра расслаивания, вздутия и коробления образцов не обнаружено. Показатель диэлектрической проницаемости после выдержки в течение 6 сут для образцов из стеклотекстолита СТ 120 снизился на 2 %, для образцов из стеклотекстолита СТ 155 – на 11 %, после выдержки в течение 21 сут для образцов из стеклотекстолита СТ 120 – на 13 %, для образцов из стеклотекстолита СТ 155 – на 16 % в сравнении с исходными значениями.

Таблица 5

Диэлектрическая проницаемость (при частоте 1 МГц) образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 после экспозиции в тепловлажностной камере по циклическому режиму

Тип образца	Диэлектрическая проницаемость		
	до экспозиции	после экспозиции в течение, сут	
		6	21
СТ 120	4,81	4,73	4,25
СТ 155	4,70	4,50	4,06

В табл. 6 представлены результаты испытаний диэлектрической проницаемости для образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 после экспозиции в камере холода при температуре -60 ± 2 °С и камере тепла при температуре 115 ± 2 °С. Установлено, что после экспозиции в приведенных условиях в течение трех циклов (один цикл: 2 ч выдержки в каждой камере) по результатам визуального осмотра расслаивания, вздутия и коробления образцов не обнаружено. Показатель диэлектрической проницаемости для образцов из стеклотекстолита СТ 120 снизился на 3 %, для образцов из стеклотекстолита СТ 155 не изменился в сравнении с исходными значениями.

Таблица 6

Диэлектрическая проницаемость (при частоте 1 МГц) образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 после экспозиции в камере холода при температуре -60 ± 2 °С и камере тепла при температуре 115 ± 2 °С в течение трех циклов

Тип образца	Диэлектрическая проницаемость	
	до экспозиции	после экспозиции
СТ 120	4,81	4,68
СТ 155	4,70	4,70

В табл. 7 представлены результаты испытаний диэлектрической проницаемости для образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 после экспозиции в камере солевого тумана. Установлено, что после экспозиции в течение 21 сут по результатам визуального осмотра расслаивания, вздутия и коробления образцов не обнаружено. Показатель диэлектрической проницаемости для стеклотекстолита СТ 120 снизился на 1 %, для стеклотекстолита СТ 155 – на 3 % в сравнении с исходными значениями.

Таблица 7

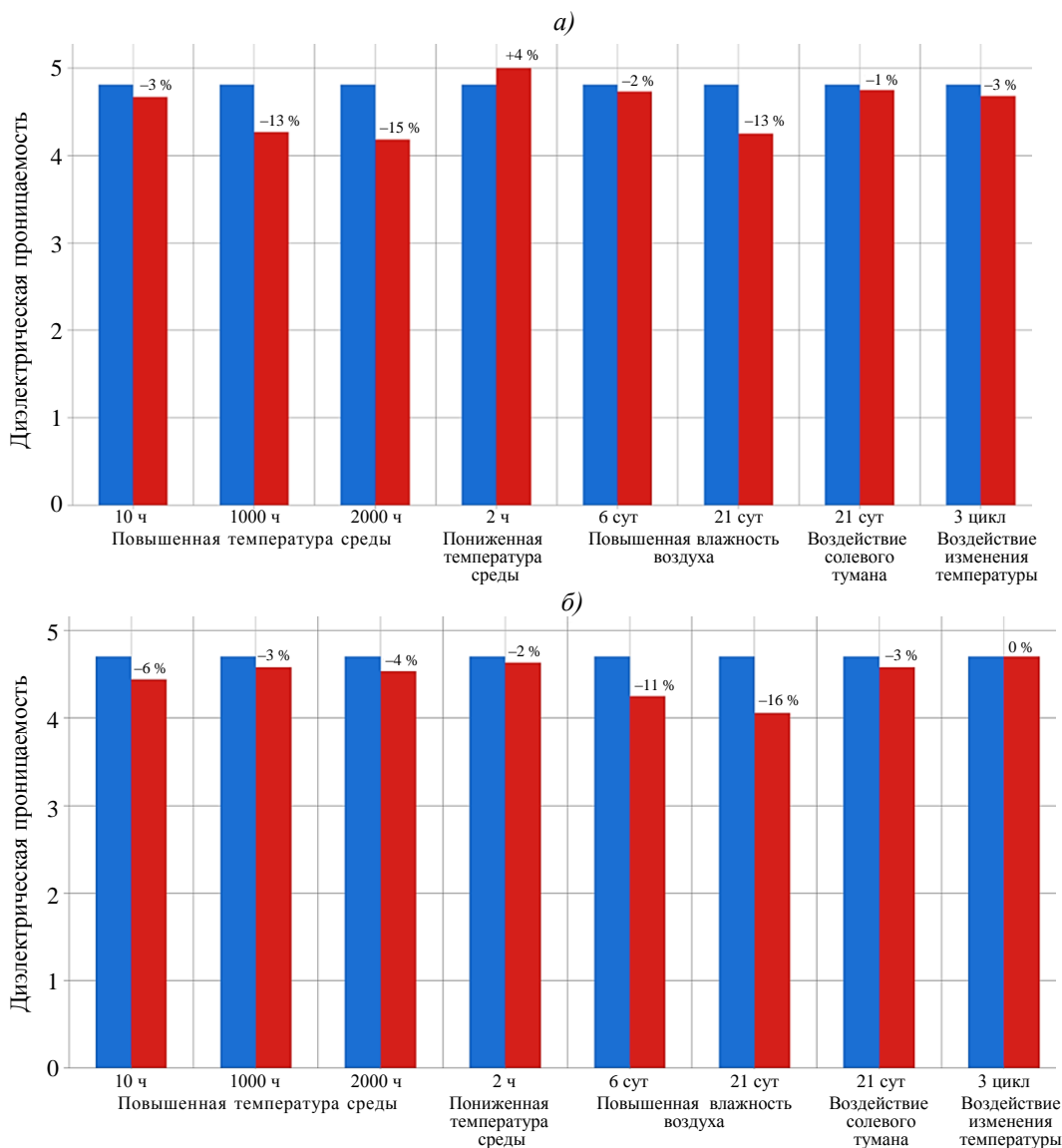
Диэлектрическая проницаемость (при частоте 1 МГц) образцов из стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 после экспозиции в камере солевого тумана в течение 21 сут

Тип образца	Диэлектрическая проницаемость	
	до экспозиции	после экспозиции
СТ 120	4,81	4,75
СТ 155	4,07	4,58

Заключения

Проведены исследования и показано, что при длительном воздействии повышенной температуры и условий тепловлажностной камеры показатель диэлектрической проницаемости материалов СТ 120 и СТ 155 снижается, максимальное снижение не превышает 15 % относительно исходных значений. Экспозиция в камерах холода и солевого тумана не оказывает влияния на показатель диэлектрической проницаемости материалов (см. рисунок).

Проведены исследования основных свойств стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155. Показано, что материал СТ 120 имеет более высокий ТКЛР в сравнении с материалом СТ 155.



Диэлектрическая проницаемость образцов из стеклотекстолитов СТ 120 (а) и СТ 155 (б) после экспозиции (■) в различных условиях в сравнении с исходными показателями (■)

Установлено, что предел прочности при изгибе образцов из стеклотекстолита СТ 120 на 36 % больше, чем у образцов из стеклотекстолита СТ 155. Установлено, что водопоглощение стеклотекстолитов СТ 120 и СТ 155 не превышает 1 %, что является допустимым значением для материалов, используемых для изготовления печатных плат.

Библиографический список

1. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат. М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2005. 560 с.
2. Медведев А.М., Можаров В.А., Мылов Г.В. Печатные платы. Современное состояние базовых материалов // Печатный монтаж. 2011. № 5 (34). С. 148–149.

3. Сарычев И.А., Серкова Е.А., Хмельницкий В.В., Застрогина О.Б. Термореактивные связующие для материалов панелей пола летательных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33.
4. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
5. Мишкин С.И., Малаховский С.С. Быстроотверждаемые связующие и препреги: получение, свойства и области применения (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-32-40.
6. Курносов А.О., Вавилова М.И., Мельников Д.А. Технологии производства стеклянных наполнителей и исследование влияния аппретирующего вещества на физико-механические характеристики стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 64–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70.
7. Медведев А.П. Печатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера, 2005. 304 с.
8. Медведев А.М. Материалы для гибких печатных плат // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 3. С. 12–19.
9. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4 (37). С. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
10. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 1. С. 34–40.
11. 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. 19–27.
12. 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. № 5. С. 412–423.
13. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 12. С. 40–46.
14. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Ерасов В.С., Анчевский И.Э., Ильин В.В., Вальтер Р.С. Стенд для испытания на климатической станции ГЦКИ крупногабаритных конструкций из ПКМ // Сб. докладов IX Междунар. науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012». Геленджик, 2012. С. 122–123.
15. Широков В.В., Романов А.М. Исследования диэлектрических характеристик стеклосотопласта волноводным методом // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 4 (29). С. 62–68.