

УДК 678.8

М.И. Дасковский¹, М.С. Дориомедов¹, Д.В. Севастьянов¹, С.Ю. Скрипачев¹**ПОЛИМЕРНЫЕ БИОКОМПОЗИТЫ –
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ (обзор)**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-74-80

В настоящее время биокomпозитные материалы – современный, инновационный продукт, в котором в качестве армирующего наполнителя применяется волокно растительного происхождения, т. е. продукт сельскохозяйственной деятельности. Приведены физико-механические свойства биокomпозитов в зависимости от типа армирующего наполнителя. По результатам анализа научно-технических публикаций представлено текущее состояние биокomпозитных технологий и применение их в различных отраслях промышленности. Особое внимание уделено анализу применения биокomпозитов в автомобильной промышленности.

Ключевые слова: полимерные биокomпозиты, биоразлагаемые связующие, натуральные волокна.

Biocomposite materials are modern industrial products, where reinforcing filler made from renewable agricultural and forestry feedstocks, which can include wood, grasses, and crops, as well as wastes and residues. The results of various natural reinforcing filler influence on physical and mechanical properties of biocomposites. According to analysis of science and research publications, the status of current biocomposite materials technologies and their use is presented in different branches of industry. Considerable growth has been seen in the use of biocomposites in the domestic sector, building materials, and automotive applications over the past decade. This article focuses specifically on the adoption of biocomposite materials in the manufacture of automotive components.

Keywords: polymer biocomposites, biodegradable matrixes, natural fibers.

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

Важность развития современных композиционных материалов в Российской Федерации трудно переоценить. С этой целью реализуется государственная подпрограмма, разработана и утверждена дорожная карта, созданы инновационные кластеры и сформированы профильные технологические платформы [1–3].

Особое место в этой сфере занимает производство новых типов конструкционных и функциональных материалов, повышающих энергоэффективность, экологичность, надежность и долговечность конечных изделий, а также снижающих материалоемкость и себестоимость [4]. В связи с этим повышенный интерес в последнее время получили полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе возобновляемых природных источников (биокomпозиты), в которых в качестве армирующего наполнителя применяются натуральные растительные волокна. Внедрение в отечественную промышленность продукции из биокomпозитов может стать драйвером роста для сельского хозяйства, текстильной промышленности, ряда подотраслей химической и нефтехимической промышленности.

Биокomпозиты можно разделить на три основные группы:

- полимеры на основе нефтехимических продуктов, армированные натуральным растительным волокном;
- небiorазлагаемые полимеры из растительного сырья, армированные натуральным растительным волокном;
- биоразлагаемые полимеры из возобновляемого сырья, армированные натуральным растительным волокном.

В силу ряда причин в настоящее время основное внимание мировых производителей сосредоточено на первой группе. Именно эта группа биокomпозитов будет рассмотрена в данной статье.

**Натуральные растительные волокна
для армирования ПКМ**

Существует большое количество видов натуральных растительных волокон, применяемых в технических целях. Волокна растительного происхождения формируются в семенах (хлопок, кокос и др.), стеблях (лен, джут, пенька, кенаф и др.), а также в листьях растений (абака, сизаль) [5]. Кроме того, источником растительных волокон являются отходы текстильной промышленности. Натуральные волокна представляют собой воспроизводимый ресурс, конкурентоспособный с точки зрения стоимости.

Таблица 1

Химический состав различных натуральных волокон

Компоненты	Хлопок	Джут	Лен	Конопля	Сизаль	Кенаф	Кокосовое волокно	Рапи (крапива китайская)	Пальма
Целлюлоза, %	82,7	61–71,5	64,1–71	70,2–74,4	65,7–78	31–39	36–43	68,6–76,2	70–82
Гемицеллюлоза, %	5,7	13,6–20,4	16,7–20,6	17,9–22,4	10,0–14,2	21,5	0,15–0,25	13,1–16,7	–
Пектин, %	–	0,2	1,8–2,3	0,9	10	–	3–4	1,9	–
Лигнин, %	–	12–13	1,7–2,0	3,7–5,7	9,9	–	41–45	0,6–0,7	5–12
Воск, %	0,6	0,5	1,5–1,7	0,8	2,0	–	–	0,3	–
Влага %	10,0	10,0	10,0	10,8	11,0	–	8,0	8,0	11,8
Угол подъема спиралей фибрилл в натуральном волокне	–	8,0	10,0	6,2	20,0	–	41–45	7,5	14,0

Физико-механические свойства некоторых натуральных волокон сопоставимы с аналогичными свойствами синтетических волокон, которые используются в качестве армирующего наполнителя в ПКМ. При этом растительные волокна обладают значительными экологическими преимуществами и не содержат токсичных веществ.

Химический состав натуральных волокон

Химический состав и структура растительных волокон в значительной степени зависят от климатических условий, возраста и метаболизма растения (табл. 1). Основными компонентами натуральных волокон (за исключением хлопка) являются лигнин, пектин (собирательное название для гетерополисахаридов, отвечающих за гибкость растения), целлюлоза, гемицеллюлоза, воск и водорастворимые вещества [6].

Механические свойства натуральных волокон

Физико-механические свойства натуральных волокон в основном определяются содержанием целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Гемицеллюлоза и пектиновые вещества отвечают за процесс биодegradации и поглощения влаги, а также за термическую деструкцию волокна. Лигнин

является термически стабильным, но деградирует под действием УФ излучения. При этом свойства отдельных волокон и их структура могут изменяться в широком диапазоне значений в зависимости от вида растения, части стебля (ближе к корню или ближе к вершине), возраста, применяемых методов экстракции, содержания влаги и т. д.

Механические свойства натуральных волокон зависят от содержания целлюлозы, степени ее полимеризации, а также от угла аксиальной ориентации спиралеобразных микрофибрилл. Волокна с более высоким содержанием целлюлозы, более высокой степенью полимеризации целлюлозы и с меньшим углом аксиальной ориентации микрофибрилл (т. е. углом подъема) обладают более высоким модулем упругости и более высокой прочностью при разрыве (рис. 1).

Поскольку в различных литературных научно-технических работах [7–10] данные о свойствах натуральных волокон существенно различаются, в табл. 2 приведены диапазоны разброса значений.

Как видно из представленных данных, значения физико-механических свойств в некоторых видах натуральных волокон существенным образом варьируются. В отдельных случаях наблюдается десятикратное отличие. Причиной

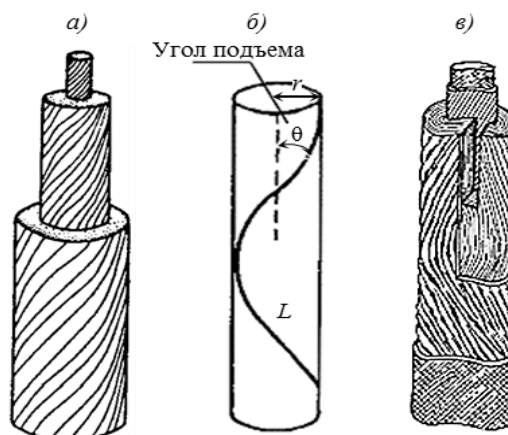


Рис. 1. Морфологическая структура волокна со спиралеобразными микрофибриллами, а также хлопкового волокна [3]:

a – ансамбль спиралеобразных фибрилл с постоянным углом подъема в натуральном волокне; *б* – путь отдельной фибриллы; *в* – модель хлопкового волокна

Таблица 2

Физико-механические свойства натуральных волокон в сравнении с синтетическими

Волокна	Предел прочности при разрыве, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Плотность, г/см ³	Удельная прочность, г/текс
Е-стекло	2500–3500	70–73	2,56	27
Углеродное волокно	2500–4000	220–700	1,75–1,9	116
Лен	500–900	50–70	1,4–1,5	33
Сизаль	80–840	9–22	1,3–1,45	6
Джут	200–450	20–55	1,3–1,4	14
Конопля	310–750	30–60	1,48	20
Банановое волокно	530–750	7–20	1,4	5
Кокосовое волокно	130–175	4–6	1,15	3
Хлопок	300–600	6–10	1,5	4
Шелк	–	–	1,34	–
Шерсть	125–200	–	1,31	–

Таблица 3

Физико-механические свойства биокomпозитов с различным армирующим наполнителем

Волокно (содержание, % (по массе))	Предел прочности при разрыве, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Предел прочности при изгибе, МПа	Модуль упругости при изгибе, ГПа	Ударная вязкость, кДж/м ²
Однонаправленные волокна					
Сизаль (40)	129	8,5	192	7,5	98
Банановое волокно (30)	121	8,0	–	–	52
Кокосовое волокно (30)	45	4	56	4	44
Беспорядочно ориентированные волокна					
Сизаль (25)	34,5	1,9	86,4	–	30
Банановое волокно (25)	43,5	2,3	92	–	10
Кокосовое волокно (25)	14,0	1,4	31,2	–	11

наблюдаемых отклонений является природная нестабильность состава растительного сырья, что отмечается во многих работах [9, 11].

Сравнение характеристик композиционных материалов

Физико-механические свойства ПКМ, в которых в качестве армирующего наполнителя применяют натуральное волокно, определяются следующими факторами: физико-механическими характеристиками волокна, природой связующего, а также уровнем адгезии на поверхности раздела «матрица–волокно».

Далее представлены данные по физико-механическим характеристикам ПКМ с однонаправленными волокнами в сравнении с беспорядочно ориентированными волокнами (табл. 3), полученные в Национальном технологическом институте (г. Сурат, Индия) и представленные в работе [11].

Применение биокomпозитов

Анализ зарубежных научно-технических публикаций (статей, тезисов конференций, обзоров) и патентных данных показал, что основными

направлениями внедрения биокomпозитов являются автомобилестроение, строительная индустрия (сайдинг, плинтус, декоринг, дверные коробки и др.), спортивный инвентарь, различные потребительские товары (рис. 2).

При этом необходимо отметить, что драйверами спроса на полимерные биокomпозиты в настоящее время являются автомобилестроение и строительная индустрия (рис. 3).

В последнее десятилетие ПКМ, армированные натуральными волокнами, начали активно применяться в автомобилестроении – при производстве дверных панелей, спинок сидений, автомобильных крыш, задних автомобильных полок, приборных досок, багажников и различных кофров.

По данным экспертов отрасли [12], ежегодный рост применения полимерных биокomпозитов в автомобильной промышленности составляет более чем 20%, что обусловлено следующими факторами:

- приемлемые прочностные и физико-механические характеристики;
- низкая стоимость;
- высокие шумоизоляционные свойства;
- возобновляемая сырьевая база;



Рис. 2. Основные направления внедрения полимерных биокomпозитов

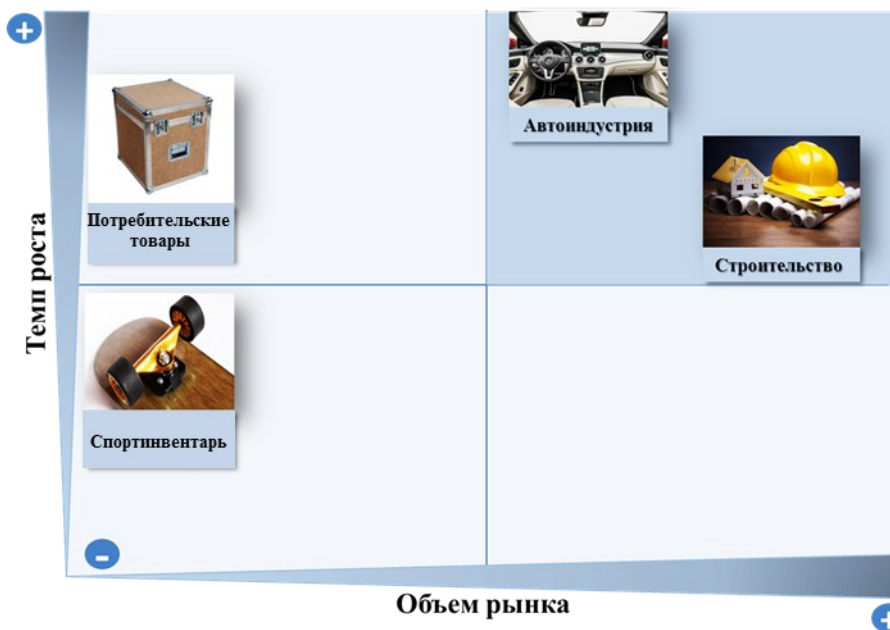


Рис. 3. Возможности роста рынка полимерных биокomпозитов в различных отраслях

- низкая плотность натуральных волокон (а значит – сравнительно малая масса конечных изделий);
- биоразлагаемость волокон и возможность переработки и безопасная для экологии утилизация конечных изделий.

При этом последние два фактора стали решающими для автопроизводителей в ходе принятия решения о массовом применении биокomпозитов в узлах и элементах конструкции автомобилей. Обусловлено это тем, что в настоящее время ев-

ропейскими и американскими государственными регуляторами перед автомобильной промышленностью поставлена задача по существенному сокращению выбросов углекислого газа.

При этом в условиях избыточности предложений, сокращения спроса на фоне продолжающегося экономического кризиса и острой конкуренции автопроизводителей основным резервом обеспечения высоких экологических требований является сокращение массы конструкций серийно выпускаемых автомобилей.

Пригодность к переработке и биоразлагаемость также делают биокompозиты привлекательными для автопроизводителей, поскольку снимают острый вопрос их дальнейшей утилизации. Так, в соответствии с Директивой 2000/53/ЕС, Европейский союз устанавливает перед странами-участниками серьезные требования по утилизации автотранспортных средств. Одно из положений указанной Директивы предусматривает повышение коэффициента повторного использования и переработки компонентов и материалов, содержащихся в одном снятом с эксплуатации автомобиле, – до 95%.

Лидерами по применению биокompозитов в конструкции автомобилей стали немецкие производители. Фирмы Mercedes, BMW, Audi и Volkswagen взяли на себя инициативу по внедрению композиционных материалов, армированных натуральными волокнами, для внутренних и наружных элементов конструкции автомобилей. При этом две трети всех натуральных волокон, потребляемых автомобильной промышленностью Европы, приходится именно на Германию, где автопроизводители из года в год увеличивают номенклатуру изделий из биокompозитов, применяемых в конструкции автомобилей.

С учетом прогнозов компании Lucintel, рынок биокompозитов в 2017 г. вырастет до 531 млн долл. США [7], а общий объем потребления натуральных волокон в европейском автомобильном секторе может вырасти до 100 000 тонн.

В табл. 4 приведены примеры применения биокompозитов в серийно выпускаемых автомобилях [14].

Для оценки объема рынка полимерных композитов, армированных натуральными волокнами, в автомобильной промышленности следует рассмотреть мировую статистику продаж автотранспортных средств, в конструкции которых применяются полимерные биокompозиты. По данным Международной организации производителей автомобилей (The International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, OICA), в 2015 г. в мире было произведено 66 млн легковых автомобилей. К 2020 г., при сохранении темпов производства, эта цифра может вырасти до 100 млн изделий в год. Доминирующим сегментом здесь является производство легковых машин, на долю которых приходится ~90% от общего числа выпускаемых транспортных единиц.

С учетом того, что снаряженная масса легкового автомобиля колеблется в диапазоне от 1300 до 1800 кг, в 2015 г. произведено легковых автомобилей общей массой порядка 135–140 млн тонн, что подтверждается данными независимых отраслевых ассоциаций. Согласно отчету Ассоциации европейских производителей стали (European steel association, Eurofer), в 2015 г. мировая сталелитейная промышленность поставила автопроизводителям 108,86 млн тонн сырья.

При этом в условиях отсутствия информации о количественном содержании натуральных волокон в составе ПКМ в автомобилях китайских производителей (в настоящее время это 18–20% от объема мирового рынка автомобилестроения), общий объем биокompозитов, произведенных в 2015 г., приблизительно оценивается на уровне

Таблица 4

Примеры применения изделий из биокompозитов в автомобильной промышленности

Марка автомобиля	Модель автомобиля	Применение
Audi	A2, A3, A4, Avant, A6, A8, Roadster, Coupe	Спинки сидений, панели дверей, настил в багажнике, задняя полка, кофр для запасного колеса
BMW	3, 5 и 7 серии	Внутренняя обшивка крыши, панели дверей, спинки сидений, настил в багажнике
Citroen	C5	Панели дверей
Mercedes	A, C, E и S-Class, EvoBus	Ветрозащитный козырек, панель приборов, столик, панели стоек, спинки сидений, панели дверей
Ford	Mondeo, Focus	Панели дверей и стоек, настил в багажнике
Opel	Astra, Vectra, Zafira	Внутренняя обшивка крыши, панели дверей и стоек, панель инструментов
Peugeot	New model 406	Панели дверей и задняя полка
Renault	Clio, Twingo	Задняя полка
Saab	–	Спинки сидений, панели дверей
Seat	–	То же
Toyota	Brevis, Harrier, Celsior, RAUM	Кوفر для запасного колеса, дверные панели и спинки сидений
Volkswagen	Golf, Passat, Variant, Bora, Fox, Polo	Дверные панели и спинки сидений, внутренняя обшивка крыши и стоек
Volvo	C70, V70	Спинки сидений и настил в багажнике

85000–90000 тонн (рис. 4). В условиях наращивания производства и в результате синергетического эффекта от реализации государственных программ и мер, направленных как на сокращение выбросов углекислого газа, так и на повышение коэффициента повторного использования и переработки компонентов и материалов, применяемых при производстве автотранспортных средств, объемы применения биокомпозитов в автомобильной отрасли будут только расти.

В табл. 5 представлен план по повышению топливной эффективности автотранспортных средств, разработанный Транспортным департаментом США в рамках стандарта Corporate Average

Fuel Economy (CAFE) для каждого класса автомашин до 2025 г. [15].

Из данных видно, что Программа США предполагает снижение расхода топлива на 48% за 2016–2025 гг. В этих условиях снижение массы конструкций автомобиля стало основной стратегией развития для автопроизводителей. Так, концерн Daimler поставил перед собой цель – уменьшить массу конструкции на 10% во всем модельном ряду, начиная с 2013 г. Кроме того, фирмы GM и Ford установили целевые показатели по сокращению массы конструкций автомобиля на 15% к 2017 г. В итоге фирмы GM и Ford планируют сократить массу конструкций своих автомобилей на 250–750 фунтов (от 113 до 340 кг) к 2020 г. [16].



Рис. 4. Сегментация отрасли автомобилестроения по типам материалов, применяемых в транспортных средствах

Таблица 5

План повышения топливной эффективности пассажирских автомобилей в США

Планируемый год выпуска модели	Легковые автомобили (миль на галлон)		Внедорожники (миль на галлон)	
	Малолитражки <i>Honda fit</i>	Бизнес-класс <i>MB S-Class</i>	Пикапы <i>Chevy s-10</i>	Полноразмерные <i>Ford F-150</i>
2012	36	28	30	22
2013	37	28,5	31	22,5
2014	38	29	32	23
2015	39	30	33	23,5
2016	41	31	34	24,5
2017	44	33	36	25
2018	45	34	37	25
2019	47	35	38	25
2020	49	36	39	25
2021	51	38	42	25
2022	53	40	44	26
2023	56	42	46	27
2024	58	44	48	28,5
2025	61	46	50	30

Заключения

Очевидно, что данное направление перспективно, поскольку замена традиционных материалов, используемых для отделки интерьеров, на биокompозитные приводит к снижению как массы изделий, так и себестоимости продукции ввиду значительно более низкой стоимости натуральных наполнителей (в 7–8 раз ниже по сравнению со стекловолокном) [17].

В большинстве случаев в качестве армирующего наполнителя для полимерных биокompозитов применяется льняная культура, что, в свою очередь, подчеркивает перспективность данного направления как с позиции наличия собственной сырьевой базы, так и с точки зрения наличия развитой отечественной текстильной отрасли.

При этом не стоит забывать, что льняное производство – старейшая, исконно русская и в

настоящее время единственная текстильная отрасль, которая обладает достаточным потенциалом для полноценной конкуренции как на внутреннем, так и на внешнем рынках [7]. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, Россия занимает третье место в мире по производству льняной культуры [18]. С учетом того, что для армирования биокompозитов применяется низкосортное грубое короткое льняное волокно (отходы льнопроизводства), данное направление может оказать позитивное влияние на льноперерабатывающую отрасль РФ.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы (ПКМ)» раздела 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дасковский М.И., Дориомедов М.С., Скрипачев С.Ю. Систематизация базисных факторов, препятствующих внедрению полимерных композиционных материалов в России (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-6-6.
2. Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Шейн Е.А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12.
3. Дориомедов М.С., Петров А.В., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю. Переработка армирующих наполнителей при утилизации изделий из ПКМ // Труды ВИАМ: науч.-технич. журн. 2016. №8. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.09.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-12-12.
4. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
5. Pandey J.K., Nagarajan V., Mohanty A.K., Misra M. Commercial potential and competitiveness of natural fiber composites // *Biocomposites: Design and Mechanical Performance*. Elsevier, 2015. P. 1–15.
6. Байклз Н., Сегал Л. Целлюлоза и ее производные. М.: Мир, 1974. Т. 1. 64 с.
7. Алеева С.В. Методологические основы совершенствования процессов биохимической модификации льняных текстильных материалов: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Иваново: ИХР РАН, 2014. 3 с.
8. Furqan Ahmad, Heung Soap Choi, Myung kyun Park. Review: Natural Fiber Composites Selection in View of Mechanical, Light Weight, and Economic Properties // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2015. Vol. 300. P. 10–24.
9. Mei-po Ho, Hao Wang, Joong-Hee Lee et al. Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites // *Composites*. Part B. 2012. Vol. 43. P. 3549–3562.
10. Holbery J., Simmons K., Nguyen N. et al. Reinforced Composite Material Research. North west National laboratory us department of Energy, 2007. URL: https://depts.washington.edu/amtas/events/amtas_08spring/PNNL.pdf (дата обращения: 17.10.2016).
11. Chaudhary V., Gohil P.P., Shaikh A.A. Development of Potential Composites through Natural Fiber Reinforcement // *Journal of Scientific & Industrial Research*. 2015. Vol. 74. P. 93–97.
12. Aparecido Paulo D.S., Joao C.G., Jay A., Glauco M. Natural Fibers Plastic Composites for Automotive Applications // *8th Annual Automotive Composites Conference & Exhibition*. Michigan, 2008. P. 492–501.
13. Natural Fiber Composites Market Trend and Forecast 2011–2016: Trend, Forecast and Opportunity Analysis. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2016. Vol. 341. P. 30–36.
14. Hill K. The Bio-Based Materials Automotive Value Chain. Center for Automotive Research, 2012. Vol. 395. P. 75–77.
15. United States Department of transportation: The Corporate Average Fuel Economy (CAFE) standards: [официальный сайт]. URL: <https://www.transportation.gov/mission/sustainability/corporate-average-fuel-economy-cafe-standards> (дата обращения: 22.10.2016).
16. Red C. Automotive CFRP: The shape of things to come // *Composites Technology*. URL: <http://www.compositesworld.com/articles/automotive-cfrp-the-shape-of-things-to-come> (дата обращения: 16.10.2016).
17. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Применение натуральных волокон при изготовлении полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №2. Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 11.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-10-10.
18. Food And Agricultural Organization of United Nations: [официальный сайт]. URL: <http://faostat.fao.org/> (дата обращения: 08.10.2016).
19. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.