

УДК 678.5.067

EDN QWRQVQ (<https://elibrary.ru/qwrqvq>)

DOI 10.33113/mkmk.ras.2025.31.02.06



ВЛИЯНИЕ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ И ВЛАЖНОГО КЛИМАТА НА ПРОЧНОСТЬ ПЛАСТИН ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ*

Митряйкин В.И.¹, Беззаметнов О.Н.¹, Тажибаева А.В.¹, Харин Н.В.²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

В удаленных районах Крайнего Севера и дальневосточных регионах России перспективным является использование ветроэнергетических установок, основные конструктивные элементы которых изготавливаются из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Применение ПКМ в конструкциях лопастей и обтекателей электрогенераторов решает ряд задач, связанных с уменьшением массы агрегатов, повышением стойкости к различным погодным и климатическим факторам и, как следствие, увеличением ресурса установки. Основным ограничением применения данных материалов для изготовления конструкций лопастей является их высокая чувствительность к ударным воздействиям, например, града или кусков льда, оторвавшихся при обогреве лопастей [1]. Существенное влияние на ПКМ в процессе длительной эксплуатации изделий оказывают климатические факторы. Температура, относительная влажность воздуха, атмосферные осадки, солнечная радиация, цикличность изменения температуры окружающего воздуха могут вызывать снижение прочностных характеристик материалов [2].

Цель работы заключается в применении различных средств диагностики для исследования деградации прочностных свойств лопастей ветрогенераторов при ударных повреждениях и воздействии влажного климата. В настоящей статье проведена сравнительная оценка ударопрочности углепластика до и после экспозиции во влажном климате. До начала испытаний были определены размеры повреждений с фиксацией глубины и площади отпечатка в зависимости от энергии удара. Образцы с нанесенными повреждениями энергией 10 Дж, 20 Дж, 30 Дж были переданы в Российско-Вьетнамский тропический центр для экспонирования в условиях трех климатических зон Вьетнама с влажным климатом на площадках Хоа Лак (г. Ханой), Кан Зё (г. Хошимин), Домбай (г. Нячанг). В статье представлены результаты исследования физико-механических свойств углепластика марки В180 после экспозиции

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-02-2021-1546 от 22 июня 2021 г., направленного на реализацию международных научных проектов с участием Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра и Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ). В ходе выполнения проекта были изготовлены образцы полимерных композитов и организована их длительная экспозиция в тропических климатических условиях Вьетнама. Экспериментальные исследования, включая анализ структурных изменений, микроскопию и обработку данных, проведены при финансовой поддержке Казанского федерального университета в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (проект № FZSM-2023-0009). Авторы выражают благодарность коллективам указанных организаций за содействие в реализации исследований.

в натуральных условиях в течение 3 лет. Исследованы геометрические размеры ударных повреждений, нанесенных на образцах различной энергией удара, установлено влияние на них релаксации в результате климатического старения.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; климатические испытания; неразрушающий контроль; ударные повреждения; статические испытания

THE INFLUENCE OF IMPACT DAMAGE AND HUMID CLIMATE ON THE STRENGTH OF POLYMER COMPOSITE PLATES

Mitryaykin V.I.¹, Bezzametnov O.N.¹, Tazhibaeva A.V.¹, Kharin N.V.²

¹*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,
Kazan, Russia*

²*Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia*

ABSTRACT

In remote areas of Russia's Far North and Far Eastern regions, the use of wind turbines whose main structural elements are made of polymer composite materials (PCM) is promising. Currently, new composite materials have become widespread in the manufacture of wind turbines. The use of PCM in the construction of blades and fairings and fairings of electric generators solves a number of problems related to reducing the weight of units, increasing resistance to various weather and climatic factors, and, as a result, increasing the service life of the installation. The main limitation of the use of these materials for the manufacture of blade structures is their high sensitivity to impact effects, for example, to hail or ice particles that have come off during blade heating. Climatic factors have a significant impact on PCM during long-term operation of products: temperature, relative humidity, precipitation, solar radiation, cyclic changes in ambient air temperature, which can cause a decrease in the strength characteristics of the materials. The aim of the work is to apply various diagnostic tools to study the degradation of the strength properties of wind turbine blades from impact damage and exposure to a humid climate. This article provides a comparative assessment of the impact resistance of carbon fiber before and after exposure to a humid climate. Before testing, the damage sizes were determined by recording the depth and area of the imprint depending on the impact energy. Samples with damage caused by energies of 10 J, 20 J, 30 J were transferred to the joint Russian-Vietnamese tropical center for exposure in three tropical climatic zones of Vietnam. At the sites of Hoa Lac (Hanoi), Can Ze (Ho Chi Minh City), Dombai (Nha Trang). The article presents the results of the study of the physical and mechanical properties of carbon fiber grade B180 after exposure in natural conditions for 3 years. The geometric dimensions of impact damage caused to samples by different impact energies were studied, and the effect of relaxation on them as a result of climatic aging was established.

Keywords: polymer composite materials; climatic tests; non-destructive testing; impact damage; static tests

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время неоднородные материалы вызывают значительный интерес в научной и инженерной сферах деятельности. Новые методы их формирования, включая аддитивное производство и безавтоклавные технологии, позволяют не только оптимизировать структуру материалов [3-5], но и расширять сферы их применения. Ключевым преимуществом современных

неоднородных материалов является их адаптивность: технология 3D-печати позволяет проектировать изделия с заданными свойствами [6-8], а композитные структуры – выдерживать экстремальные нагрузки в агрессивных средах. Несмотря на эти преимущества, климатические факторы, такие как повышенная влажность, температурные колебания и ультрафиолетовое излучение, существенно изменяют физико-механические характеристики материалов [9-13]. Длительное воздействие внешней среды приводит к деградации полимерной матрицы, образованию микротрещин и снижению прочностных и жесткостных свойств композитов. Это особенно критично для конструкций, эксплуатируемых в тропических регионах, где сочетание высокой влажности и УФ-излучения ускоряет процессы старения. Проблема ударных повреждений композиционных конструкций является одной из основных при оценке эксплуатационной прочности. Ударные повреждения могут вызывать значительные внутренние разрушения слоев ПКМ, что приводит к снижению прочности всей конструкции. В соответствии с рекомендациями нормативных документов повреждение не должно снижать прочность конструкций ниже расчетных значений при действии эксплуатационных нагрузок. Размеры ударных повреждений зависят от характеристик материала и энергии удара [14-16].

Экспериментальные методы исследования композитов позволят не только лучше понять процесс деградации таких материалов, но и разработать эффективные методы производства и постобработки [18,19], что позволит улучшить физико-механические свойства, обеспечить надежность и безопасность конструкций, изготовленных из КМ.

Мировые тенденции учета влияния климатического воздействия на материалы, конструкции и сооружения показывают, что эксперименты необходимо проводить с освоением новых методов оценки воздействия природных сред. Прогнозирование срока службы ПКМ при воздействии факторов внешней среды проводится в несколько этапов. На первом этапе выполняются лабораторные исследования в климатических камерах. На втором этапе, по мнению отечественных и зарубежных специалистов, необходимо проводить испытания материалов в различных климатических зонах, что позволит оценить динамику изменения свойств материалов после экспозиции.

Данное исследование посвящено изучению изменения механических характеристик конструкций из ПКМ при ударном повреждении в условиях влажного и жаркого климата. В работе представлены образцы из углепластика В-180, которые были изготовлены и отправлены на длительную экспозицию в различные климатические зоны Вьетнама на 3 года.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исследуемых объектов были выбраны образцы из углепластика на основе препрега В180 саржевого плетения с направлением волокон $0^{\circ}/90^{\circ}$. Выбор углепластика обусловлен тем, что углепластик обладает высокими эксплуатационными характеристиками, предназначен для деталей, эксплуатирующихся при температурах до 150°C . В качестве связующего материала использовалась эпоксидная композиция: смола SICOMIN SR 8500 и отвердитель SICOMIN SZ 8525. Данный состав обладает высокой технологичностью, а именно низкой вязкостью и коротким временем отверждения.

Для определения влияния тропического климата на изменение внутренней структуры и физико-механических свойств ПКМ были изготовлены образцы, каждый из которых предназначен для двух видов механических испытаний – растяжения и сжатия. Исследуемые образцы имели сплетение типа саржа 2х2, с поверхностной плотностью 200 г/м². Образцы имели армирующую укладку 0°/90° с использованием десяти слоев. Толщина слоя составляла 0.2 мм.

Образцы представляли собой полосы прямоугольного сечения. Испытания были проведены на электромеханической универсальной испытательной машине Instron 5882 (100 кН) с регистрирующим программно-аппаратным комплексом Instron 5800. Испытательная машина включала силоизмерительный тензометрический датчик 100 кН и экстензометр для измерения продольной деформации Epsilon 3542-050M-100-ST, s/n E88802, класс точности B1. База измерения деформации – 50 мм.

По результатам предварительных испытаний контрольной группы образцов были получены механические характеристики, представленные в Таблице 1.

Таблица 1.

Механические характеристики контрольной группы.

Наименование	Механические характеристики
Предел прочности при растяжении, МПа	924.842
Модуль упругости при растяжении, ГПа	68.945
Относительное удлинение, %	1.5
Предел прочности при сжатии, МПа	744.969
Модуль упругости при сжатии, ГПа	62.734
Относительная деформация при сжатии, %	1.18

Ударная машина с вертикально-падающим грузом Instron Dunatup 9250HV осуществляла ударное воздействие на образцы из ПКМ. Данная машина имеет чувствительный пьезометрический датчик нагрузки с точностью $\pm 1\%$ от измеряемого диапазона, оснащена пневматической системой предотвращения повторного удара. Необходимая энергия удара достигается путём подъёма взвешенного груза на определённую высоту [17]. Методика проведения эксперимента создана с учётом отраслевых стандартов испытаний композиционных материалов. Образцы с нанесенными повреждениями энергией 10 Дж, 20 Дж, 30 Дж показаны на рис.1.

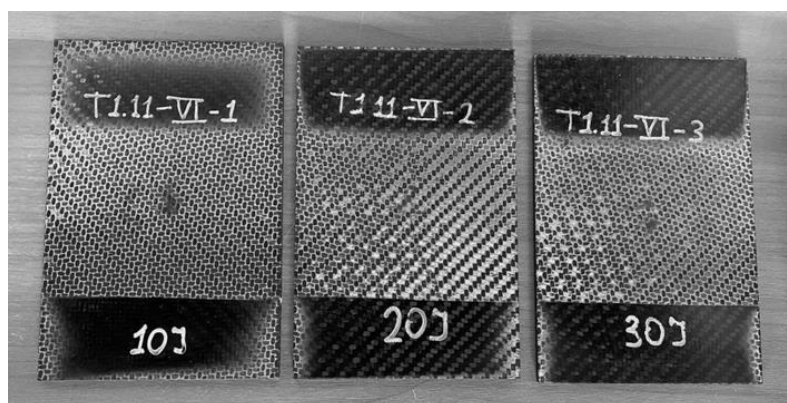


Рис.1. Образцы с ударными повреждениями.

После удара были определены размеры повреждений с фиксацией глубины δ и площади S отпечатка в зависимости от энергии удара с целью последующей оценки их релаксации после длительной экспозиции во влажном климате.

Образцы с ударными повреждениями были отправлены в Тропический центр Вьетнама для экспонирования в условиях трех тропических климатических зон на площадках Хоа Лак (г. Ханой), Кан Зё (г. Хошимин), Домбай (г. Нячанг). Образцы были размещены на металлических стеллажах лицевой стороной к южной стороне под углом 45° и экспонировались на протяжении 3-х лет (рис.2).

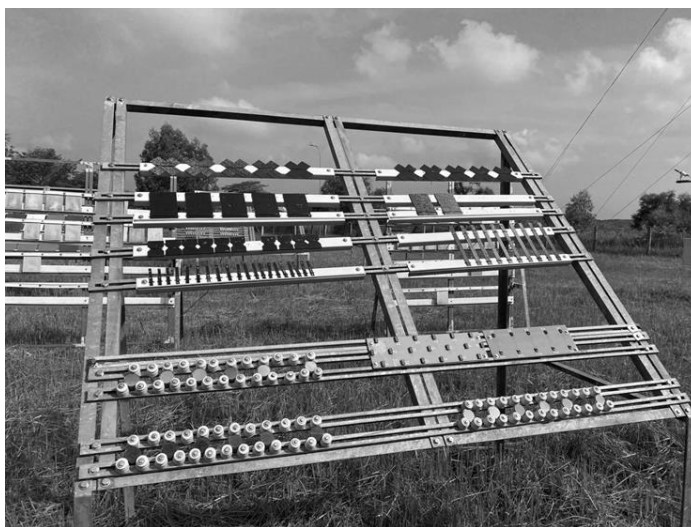


Рис.2. Стенд для экспонирования образцов на площадке Кан Зё.

На протяжении всего времени экспонирования проводился непрерывный сбор данных температуры (циклограмм) и влажности на позициях размещения экспонируемых образцов приборами измерения температурно-влажности НОВО. Производилась ежедневная фиксация времени и степени воздействия солнечной активности (в ультрафиолетовой части спектра излучения) и дождевого воздействия на образцы.

Для исследования изменений внешней поверхности композитного материала в условиях длительной экспозиции была проведена микроскопия. Анализ осуществлялся с использованием цифрового микроскопа LEVENHUK DTX 700 LCD 75075. Для каждого образца были отобраны участки, демонстрирующие характерные изменения внешней структуры. Исследование включало анализ как поверхностей, подвергавшихся длительному воздействию погодных факторов, так и тех, которые оставались неизменными.

Для исследования площади внутренних разрушений при различных энергиях удара было проведено сканирование при помощи комплекса неразрушающего полуавтоматического контроля OmniScan MX2 с датчиком 3.5 МГц с фазированными решетками. Сканирование образцов проводилось при полном погружении в контактную жидкость. Ультразвуковой комплекс, обрабатывая массив сканов, строит двумерное изображение объекта в плане, которое используется для оценки площади повреждений после удара.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Внешний осмотр образцов ПКМ после экспозиции показал различное состояние лицевой поверхности, обращенной к солнцу при экспонировании, и тыльной (теневого) поверхности. Лицевая поверхность на всех образцах повреждена гораздо сильнее, чем тыльная сторона. На лицевой стороне в большей степени наблюдается деградация полимерной матрицы и эрозионные повреждения волокон.

При микроскопическом сравнении внешней поверхности образцов до и после экспозиции были получены характерные изображения изменений их структуры. Рис.3а демонстрирует верхнюю поверхность образцов, экспонированных в г. Нячанг, подверженных воздействию природных факторов, тогда как рис.3б отображает обратную сторону, не подвергавшуюся такому влиянию.

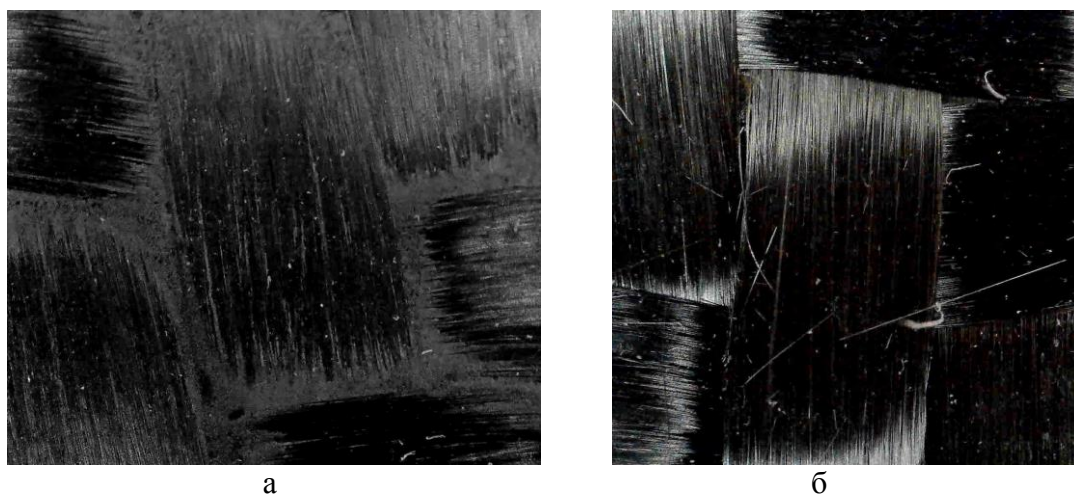


Рис.3. Поверхность образца, г. Нячанг: а) сторона, подвергшаяся природным воздействиям, б) обратная сторона.

На поверхности, не подвергавшейся внешним воздействиям (рис.3б), наблюдается потеря пигмента волокон, в то время как на лицевой поверхности (рис.3а) участки приобретают коричневый оттенок, что свидетельствует о разрушении матричной структуры композита.

Образцы, экспонированные в г. Ханой, демонстрируют схожие изменения внешней поверхности (рис.4а). Участки приобретают коричневый оттенок, что говорит о разрушении матричной структуры.

В отличие от образцов из г. Нячанг, утрата пигмента фиксируется не только по краям сегмента композита, но и по всей их длине (рис.4б).

Аналогичные явления наблюдаются для образцов, экспонированных в г. Хошимин. Здесь, как видно на рис.5б, пигмент теряется по всей длине сегмента.

При анализе поверхности, подвергшейся погодным факторам (рис.5а), можно заметить, что в отличие от предыдущих случаев, процесс деградации находится на начальной стадии, что подтверждается сохранением структуры волокон.

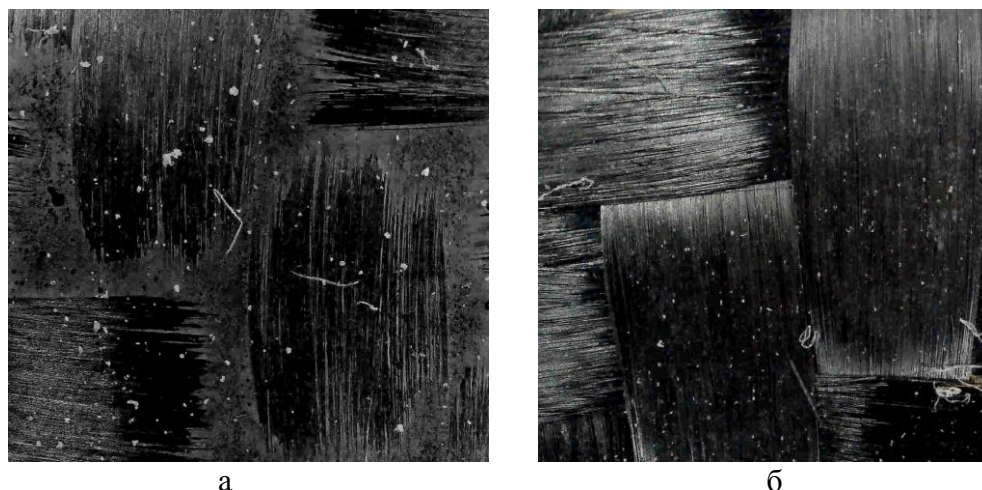


Рис.4. Поверхность образца, г. Ханой: а) сторона, подвергшаяся природным факторам, б) обратная сторона.

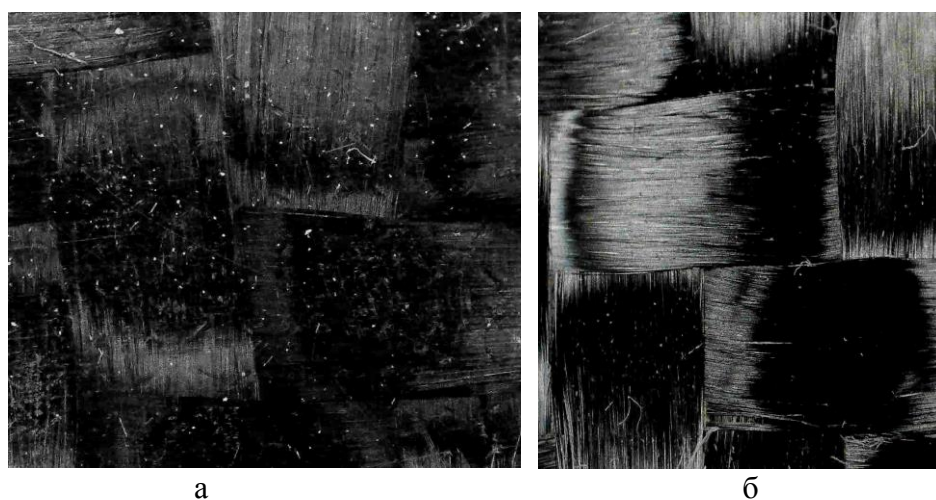


Рис.5. Поверхность образца, г. Хошимин: а) сторона, подвергшаяся природным факторам, б) обратная сторона.

В работе [18] приведены результаты исследований, связанных с релаксацией образцов ПКМ. Отмечено, что размеры вмятин могут уменьшаться в результате длительного пребывания в условиях влажного климата. Выводы авторов [18] были подтверждены при сравнении размеров ударных повреждений до и после длительной экспозиции наших образцов (Таблица 2).

Таблица 2.

Сравнительные результаты измерения размеров повреждений.

G , Дж	δ , мм	δ^k , мм	$\frac{\delta}{\delta^k}$, %	S , мм ²	S^k , мм ²	ΔS , %
10	0,154	0,103	33,1	103,6	98,7	4,7
20	0,335	0,203	39,4	244,9	238,3	2,7
30	0,669	0,460	31,2	386,5	374,2	3,2

Глубина вмятин δ^k после экспозиции во влажном климате уменьшилась по сравнению с первоначальной глубиной δ на 31-39%. Площадь повреждений S^k изменилась незначительно в сравнении с первоначальными значениями S .

Видимые повреждения на поверхности образцов из ПКМ не дают полного представления о разрушениях внутри материала, поэтому область повреждений образцов оценивали ультразвуковым методом. На рис.6 показаны результаты ультразвукового сканирования образцов с ударными повреждениями, нанесенными различной энергией удара после экспозиции во влажном климате, и характер локальных дефектов. Видно, что с увеличением энергии удара размеры повреждений возрастают. Штриховой линией на увеличенных картинах повреждений показаны максимальные диаметры поврежденных зон.

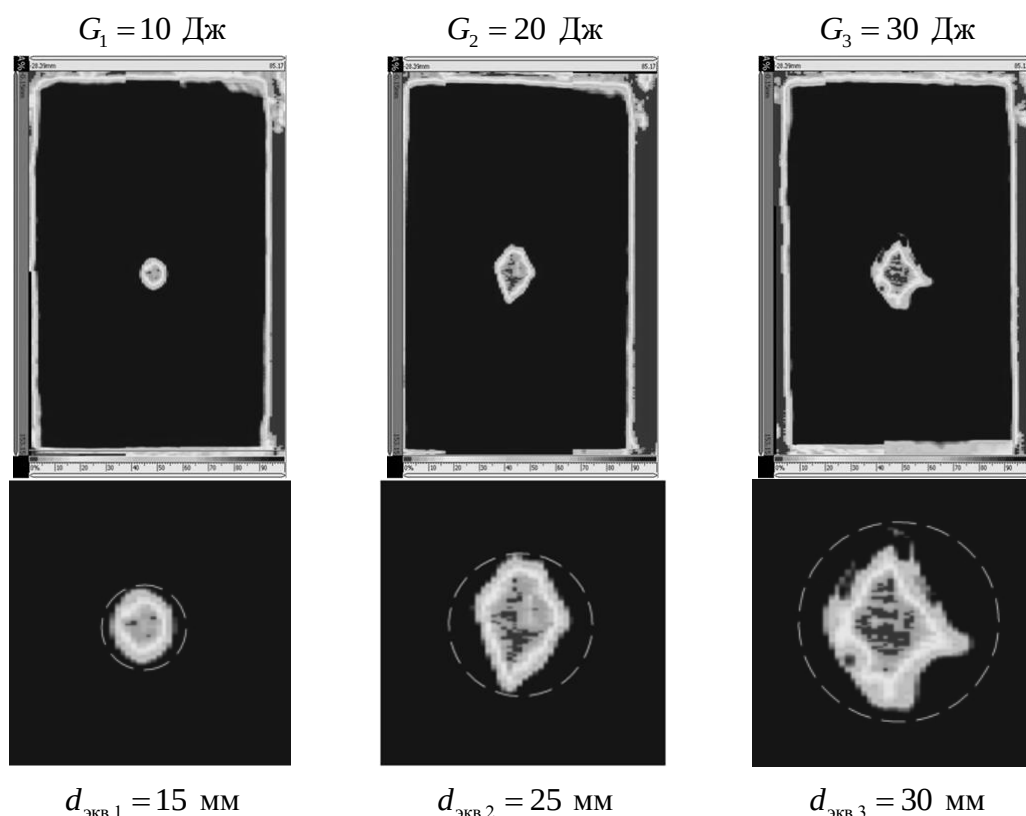


Рис.6. Результаты ультразвукового сканирования образцов после ударного воздействия.

Отношение максимальной площади повреждения к размеру пластины составляет 2,5%. Эти результаты можно использовать при прочностных расчетах с применением критерия эквивалентных отверстий или при планировании ремонта.

Испытания образцов, имеющих ударные повреждения при действии на них сжимающей нагрузки, проводились на электромеханической универсальной испытательной машине Instron 5882 с регистрирующим программно-аппаратным комплексом Instron 5800. Наибольшая нагрузка, которую может воспроизводить испытательная машина, составляет 100 кН. Для измерения значений нагрузки применяется силоизмерительный тензометрический датчик Instron, точность измерения силы сжатия составляет $\pm 0.15\%$ от диапазона измерения. Деформация образца при сжатии определялась с помощью датчика перемещения траверсы, которая давила на образец. При разрушении образца фиксировались наибольшая нагрузка сжатия $P_{кр}$ и предел прочности при сжатии после удара σ_b . В первую очередь фиксировалась критическая нагрузка

разрушения пластин при сжатии без повреждений. Далее испытывались образцы с большей энергией удара, и определялась зависимость падения нагрузки, данный параметр характеризует величину постударной несущей способности материала. По полученным данным строили диаграммы снижения прочностных характеристик различных образцов с повреждениями. На рис.7 показано влияние энергии удара и климатических факторов на критическую нагрузку при сжатии пластин после 3-х лет экспозиции во влажном климате».

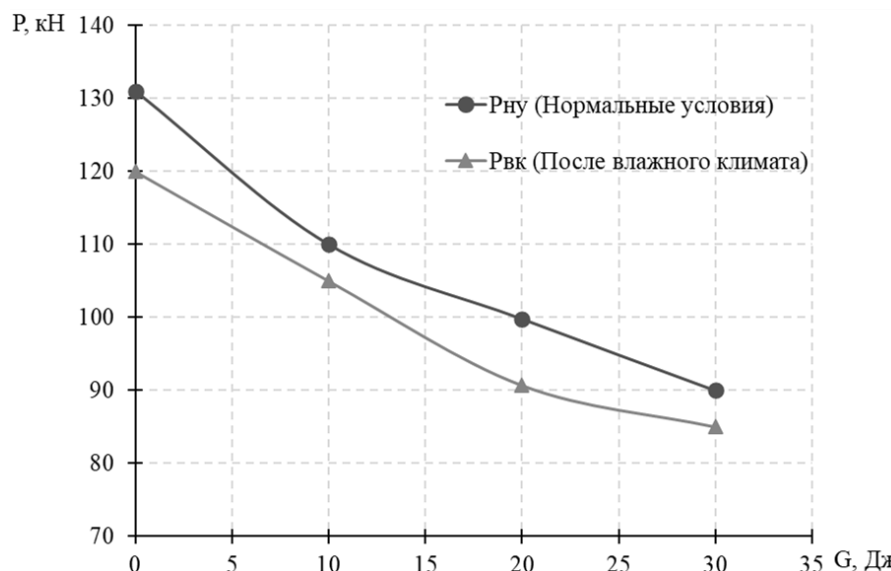


Рис.7. Диаграммы изменения максимальной нагрузки при сжатии от энергии удара.

На рис.8 показан характер разрушения пластин при сжатии: тип разрушения «поперечный», разрушение в середине образца.

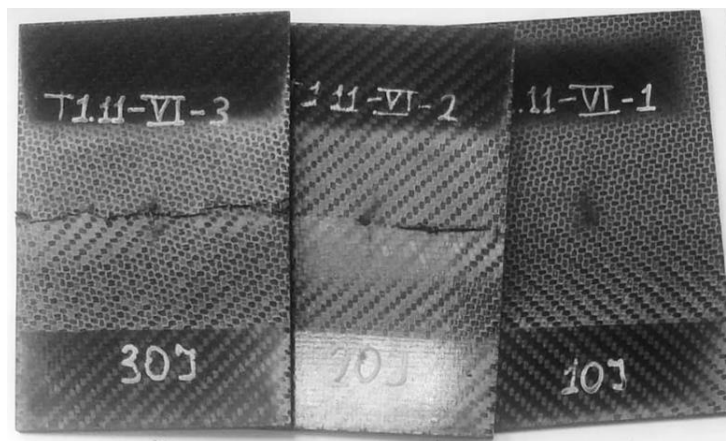


Рис.8. Образцы с ударными повреждениями после сжатия.

Установлено, что трёхлетняя экспозиция во влажном климате образцов углепластика В180 с ударными повреждениями на 5-9% снижает критическую нагрузку при сжатии.

После экспонирования в течение трех лет образцы были испытаны на растяжение и сжатие. Анализ полученных данных показал, что во всех группах образцов распределение механических характеристик соответствует нормальному закону. Группы полученных характеристик проверялись при помощи парного t -критерия Стьюдента для определения независимых выборок с p -значимостью

0.05. При анализе предела прочности и модуля упругости статистически значимые различия при растяжении обозначались знаком «*», при сжатии обозначались знаком «%». На рис.9 представлено распределение механических характеристик в зависимости от зоны экспонирования.

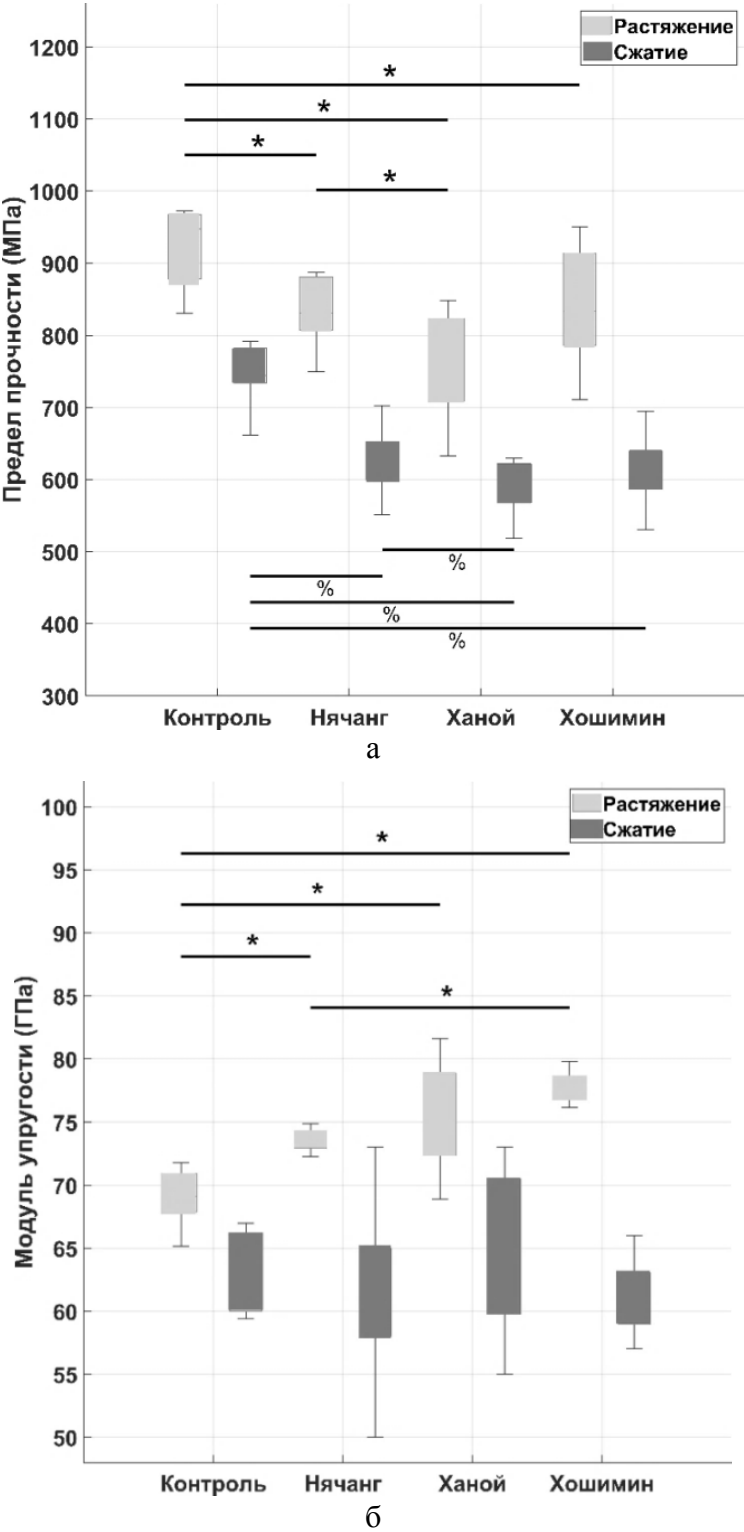


Рис.9. Механические характеристики после воздействия влажного климата: а) предел прочности, б) модуль упругости.

На основании полученных результатов можно оценить уменьшение значений предела прочности, относительных деформаций и увеличение значений модуля упругости и коэффициента Пуассона при совместном влиянии повышенной температуры и влажности на образцы из ПКМ. Предел прочности при растяжении образцов на станции Кан Зё понизился на 9%, на станции Домбай понизился на 16%, на станции Хоа Лак понизился на 23%. В свою очередь, модуль упругости повысился на 11%, 7% и 6% на каждой станции соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования свойств углепластика марки В180 после экспозиции в натуральных условиях в течение 3 лет в трех климатических зонах с влажным климатом Вьетнама. Определено изменение физико-механических характеристик материала (предела прочности и модуля упругости при растяжении и сжатии образцов). Исследованы геометрические размеры ударных повреждений, нанесенных на образцах различной энергией удара 10 Дж, 20 Дж, 30 Дж, установлено влияние на них релаксации в результате климатического старения. Испытания образцов, имеющих ударные повреждения при действии на них сжимающей нагрузки, показали, что после пребывания образцов с ударными повреждениями во влажном климате предел прочности при сжатии снижается. Полученные результаты можно использовать для материала лопастей ветрогенераторов, эксплуатирующихся во влажном климате.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беззаметнов О.Н., Кузнецов М.Е., Митряйкин В.И., Тажибаева А.В. *Влияние климатических факторов и ударных повреждений на прочность лопасти ветрогенератора* / XXVIII международный симпозиум имени А.Г. Горшкова «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред материалы». Том 1. – Москва, 2022. – С. 36-38.
2. Евдокимов А.А., Петрова А.П., Павловский К.А., Гуляев И.Н. *Влияние климатического старения на свойства пкм на основе эпоксивинилэфирного связующего* // Труды ВИАМ. – 2021. – С.128-136.
3. Bolshakov P., Kharin N., Agathonov A., Kalinin E., Sachenkov O. *Extension of the Voronoi diagram algorithm to orthotropic space for material structural design* // Biomimetics. – 2024. – Vol.9(3). – 185.
4. Xu Y., Feng Z., Gao Y., Wu C., Fang J., Sun G., ... & Li Q. *Topology optimization for additive manufacturing of CFRP structures* // International Journal of Mechanical Sciences. – 2024. – Vol.269. – 108967.
5. Ren H., Wang D., Liu G., Rosen D.W., Xiong Y. *Concurrent optimization of structural topology and toolpath for additive manufacturing of continuous fiber-reinforced polymer composites*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2024. – Vol.430. – 117227.
6. Bolshakov P., Kuchumov A.G., Kharin N., Akifyev K., Statsenko E., Silberschmidt V.V. *Method of computational design for additive manufacturing of hip endoprosthesis based on basic-cell concept* // Int. J. Numer. Method Biomed. Eng. – 2024. – Vol.40. – e3802.

7. Khan N., Riccio A. *A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: Current trends and future directions* // Progress in Aerospace Sciences. – 2024. – Vol.149. – 101021.
8. Collini F., Meneghetti G. *Towards a fracture mechanics-based fatigue assessment of lattice structures obtained from additive manufacturing of metallic powders* // Materials & Design. – 2024. – 113077.
9. Доан Чак Луат, Дудченко А.А., Лурье С.А. *Моделирование деградации свойств композита при растрескивании и расслоении при статическом и циклическом нагружении* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2008. – Т.14. – №4. – С.623-637.
10. Бохоева Л.А. *Особенности расчета на прочность элементов конструкций из изотропных и композиционных материалов с допустимыми дефектами.* – Улан-Удэ: Изд-во Вост.-Сиб. технол. ун-та, 2007. – 192 с.
11. Muc A., Stawiarski A., *Identification of damages in composite multilayered cylindrical panels with delamination's* // Composite Structures. – 2012. – Vol.94. – No.5. – Pp.1871-1879.
12. Paimushin V.N., Kayumov R.A., Kholmogorov S.A. *Degradation of the Mechanical Properties of Fiber Reinforced Plastic under Cyclic Loading* // Mechanics of Composite Materials. – 2023. – Vol.59(2). – Pp.371-380.
13. Богомолова А.Д., Сеницын А.В. *Исследование влияния эксплуатационных и климатических внешних воздействующих факторов (ВВФ) на характеристики прочности углепластиков авиационного назначения* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2024. – Т.30 – №3. – С.420-433
14. Ерасов В.С., Крылов В.Д., Панин С.В., Гончаров А.А. *Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом* // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – №3. – С.60-64.
15. Митряйкин В.И., Беззаметнов О.Н., Кротова Е.В. *Исследование прочности композиционных материалов с ударными повреждениями*// Изв. Вузов. Авиационная техника. – 2020. – Т.63. – №3. – С.27-33.
16. Чулков Д.И., Терехин А.В., Типикин М.Е., Думанский А.М. *Ультразвуковой контроль качества пропитки стеклопластиковых элементов конструкций летательных аппаратов органическими смолами* // Изв. Вузов. Машиностроение. – 2023. – №3(756). – С.46-54.
17. Митряйкин В.И., Беззаметнов О.Н. *Прочность многослойных пластин с ударными повреждениями* // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. – 2022. – Т.164. – №2-3. – С.206-220.
18. Yimyai T., Crespy D., Pena-Francesch A. *Self-Healing Photochromic Elastomer Composites for Wearable UV-Sensors*. Advanced Functional Materials. – 2023. – Vol.33. – Iss.20. – 2213717. DOI: 10.1002/adfm.202213717.
19. Sun Y., Yuan S., Fan W., Lin D., Zhang K., Bai Z., Zhu Y., Wang H. *A Smart Composite Coating with Photothermal Response, Anti-UV and Anti-Corrosion Properties* // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol.452. – Part 1. – 138983.
20. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. *Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор)* // Авиационные материалы и технологии. – 2021. – №4(65). – С.80-90.

REFERENCES

1. Bezzametnov O.N., Kuznecov M.E., Mitryajkin V.I., Tazhibaeva A.V. *Vliyanie klimaticheskikh faktorov i udarnykh povrezhdenij na prochnost' lopasti vetrogeneratora [The influence of climatic factors and impact damage on the strength of a wind turbine blade]*. XXVIII mezhdunarodnyj simpozium imeni A.G. Gorshkova «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksij i sploshnykh sred materialy». Tom 1. Moskva, 2022. Pp.36-38.
2. Evdokimov A.A., Petrova A.P., Pavlovskij K.A., Gulyaev I.N. *Vliyanie klimaticheskogo stareniya na svoystva pkm na osnove ehpoksinilehfirmogo svyazuyushhego [The influence of climatic aging on the properties of epoxyvinyl ester-based PCMs]*. Trudy VIAM, 2021, Pp.128-136.
3. Bolshakov P., Kharin N., Agathonov A., Kalinin E., Sachenkov O. *Extension of the Voronoi diagram algorithm to orthotropic space for material structural design*. Biomimetics, 2024, Vol.9(3), 185.
4. Xu Y., Feng Z., Gao Y., Wu C., Fang J., Sun G., Li Q. *Topology optimization for additive manufacturing of CFRP structures*. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, Vol.269, 108967.
5. Ren H., Wang D., Liu G., Rosen D.W., Xiong Y. *Concurrent optimization of structural topology and toolpath for additive manufacturing of continuous fiber-reinforced polymer composites*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2024, Vol.430, 117227.
6. Bolshakov P., Kuchumov A.G., Kharin N., Akifyev K., Statsenko E., Silberschmidt V.V. *Method of computational design for additive manufacturing of hip endoprosthesis based on basic-cell concept*. Int. J. Numer. Method Biomed. Eng., 2024, Vol.40, e3802.
7. Khan N., Riccio A. *A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: Current trends and future directions*. Progress in Aerospace Sciences, 2024, Vol.149, 101021.
8. Collini F., Meneghetti G. *Towards a fracture mechanics-based fatigue assessment of lattice structures obtained from additive manufacturing of metallic powders*. Materials & Design, 2024, 113077.
9. Doan Chak Luat, Dudchenko A.A., Lur'e S.A. *Modelirovanie degradatsii svoystv kompozita pri rastreskivanii i rassloenii pri staticheskom i tsiklicheskom nagruzhении [Modeling of composite property degradation during cracking and delamination under static and cyclic]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2008, Vol.14, No.4, Pp.623-637.
10. Bokhoeva L.A. *Osobennosti rascheta na prochnost' ehlementov konstruksij iz izotropnykh i kompozitsionnykh materialov s dopustimymi defektami [Features of strength calculation of structural elements made of isotropic and composite materials with permissible defects]*. Ulan-Udeh, Izdatel'stvo Vostochno-Sibirskogo tekhnol. universiteta, 2007, 192 p.
11. Muc A., Stawiarski A. *Identification of damages in composite multilayered cylindrical panels with delamination's*. Composite Structures, 2012, Vol.94, No.5, Pp.1871-1879.
12. Paimushin V.N., Kayumov R.A., Kholmogorov S.A. *Degradation of the Mechanical Properties of Fiber Reinforced Plastic under Cyclic Loading*. Mechanics of Composite Materials, 2023, Vol.59(2), Pp.371-380.
13. Bogomolova A.D., Sinitsyn A.V. *Issledovanie vliyaniya ehkspluatatsionnykh i klimaticheskikh vneshnikh vozdeystviyushhikh faktorov (VVF) na kharakteristiki*

prochnosti ugleplastikov aviatsionnogo naznacheniya [Study of the influence of operational and climatic external influencing factors (EIF) on the strength characteristics of carbon fiber reinforced plastics for aviation purposes]. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2024, Vol.30, No.3, Pp.420-433.

14. Erasov V.S., Kry'lov V.D., Panin S.V., Goncharov A.A. *Ispytaniya polimernogo kompozitsionnogo materiala na udar padayushhim грузом [Drop Weight Impact Testing of Polymer Composite Material]*. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2013, No.3, Pp.60-64.
15. Mitryajkin V.I., Bezzametnov O.N., Krotova E.V. *Issledovanie prochnosti kompozitsionnykh materialov s udarnymi povrezhdeniyami [Study of the strength of composite materials with impact damage]*. *Izvestiya Vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2020, Vol.63, No3, Pp.27-33.
16. Chulkov D.I., Terexin A.V., Tipikin M.E., Dumanskij A.M. *Ul'trazvukovoj kontrol' kachestva propitki stekloplastikovykh ehlementov konstruksij letatel'nykh apparatov organicheskimi smolami [Ultrasonic quality control of impregnation of fiberglass elements of aircraft structures with organic resins]*. *Izvestiya Vuzov. Mashinostroenie*, 2023, No.3(756), Pp.46-54.
17. Mitryajkin V.I., Bezzametnov O.N. *Prochnost' mnogoslojnykh plastin s udarnymi povrezhdeniyami [Durability of multilayer plates with impact damage]*. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki*, 2022, Vol.164, No.2-3, Pp.206-220.
18. Yimyai T., Crespy D., Pena-Francesch A. *Self-Healing Photochromic Elastomer Composites for Wearable UV-Sensors*. *Advanced Functional Materials*, 2023, Vol.33, Iss.20, 2213717. DOI: 10.1002/adfm.202213717.
19. Sun Y., Yuan S., Fan W., Lin D., Zhang K., Bai Z., Zhu Y., Wang H. *A Smart Composite Coating with Photothermal Response, Anti-UV and Anti-Corrosion Properties*. *Chemical Engineering Journal*, 2022, Vol.452, Part 1, 138983. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138983.
20. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. *Relaksatsiya polimernykh kompozitsionnykh materialov pod dlitel'nym dejstviem staticheskoy nagruzki i klimata (obzor) [Relaxation of polymer composite materials under long-term static load and climate (review)]*. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2021, No.4(65), Pp.80-90.

Поступила в редакцию 17 мая 2025 года.

Сведения об авторах:

Митряйкин Виктор Иванович – д.т.н., проф., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия; e-mail: ymitryaykin@bk.ru

Тажибаева Александра Валерьевна – ассистент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия; e-mail: alekkuzmina@mail.ru

Беззаметнов Олег Николаевич – к.т.н., с.н.с., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия; e-mail: bezzametnovoleg@mail.ru

Харин Никита Вячеславович – н.с., Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия; e-mail: nik1314@mail.ru