

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 338.4
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-175-185



ВЫБОР МАТЕРИАЛА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЕНТИЛЯТОРОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АРКТИЧЕСКОГО И СУБАРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНОВ

Ермаков С.Б.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. Смещение основных добывающих производств в северные и северо-восточные регионы страны, интенсификация промышленного и жилищного строительства в районах Крайнего Севера поставили ряд сложных технологических задач по адаптации различных видов основного и вспомогательного оборудования к экстремальным климатическим условиям Арктического и Субарктического регионов. К числу такого оборудования относятся системы вентиляции и охлаждения производственных помещений, различной стационарно размещенной и мобильной техники. Как показал анализ фактической эксплуатации вентиляторов в условиях низких климатических температур и высокой влажности северных территорий, использование для их изготовления традиционных материалов, например полимерных композиционных материалов на полибутилентерефталатной матрице, оказывается в ряде случаев невозможным из-за их низкой холодо- и трещиностойкости, приводящих к разрушению корпусов и крыльчаток вентиляторов. В работе проведен анализ возможности применения полимерных композиционных материалов для изготовления основных узлов осевого вентилятора, эксплуатация которого предполагается в условиях арктического климата, выполнены математическое моделирование условий эксплуатации вентилятора в программном комплексе ANSYS и FMEA-анализ рисков, проведена оценка критических факторов воздействия на надёжность и долговечность вентиляторов, изготовленных из различных полимерных композиционных материалов и эксплуатируемых при экстремально низких температурах воздуха, выполнена оценка деградации механических свойств полимерных композиционных материалов в условиях длительного воздействия низких температур окружающей среды, повышенных температур эксплуатации, показано влияние переходов температуры окружающей среды через ноль и повышенной засоленности воздуха. Показана возможность изготовления корпусов и крыльчаток вентиляторов для эксплуатации в условиях Арктики из стеклонеполненных полимерных композиционных материалов с поликарбонатной матрицей.

Ключевые слова: математическое моделирование, анализ рисков, полимерные композиционные материалы, деградация свойств в условиях климата Арктики

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FEWN-2025-0005 Разработка методик определения материалов в качестве строительных конструкций, деталей и узлов оборудования нефтедобывающих предприятий в Арктической и Субарктической зонах России).

© Ермаков С.Б., 2025

Для цитирования

Ермаков С.Б. Выбор материала и обеспечение качества вентиляторов из полимерных композиционных материалов для климатических условий Арктического и Субарктического регионов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 175-185. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-175-185>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MATERIAL SELECTION AND QUALITY ASSURANCE OF FANS MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE ARCTIC AND SUBARCTIC REGIONS

Ermakov S.B.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. The shift of the main extractive industries to the northern and northeastern regions of the country, and the intensification of industrial and housing construction in the Far North have posed several complex technological challenges to adapt various types of basic and auxiliary equipment to the extreme climatic conditions of the Arctic and Subarctic regions. Such equipment includes ventilation and cooling systems for industrial premises, various stationery and mobile equipment. As the analysis of the actual operation of fans in conditions of low climatic temperatures and high humidity in the northern areas has shown, the use of traditional materials for their manufacture, for example, polymer composite materials based on polybutylene terephthalate matrix, is in some cases impossible due to their low cold and crack resistance, leading to the destruction of fan housings and impellers. The paper analyzes the possibility of using polymer composite materials to manufacture the main components of an axial fan, which is expected to operate in an Arctic climate. Mathematical modeling of fan operating conditions in the ANSYS software package and FMEA risk analysis is performed. Assessment of critical factors affecting the reliability and durability of fans made of various polymer composite materials and operated at extremely low temperatures. Data on degradation of the mechanical properties of polymer composite materials under conditions of prolonged exposure to low ambient temperatures and increased operating temperatures are provided. The rate of degradation of strength properties under the influence of thermal cyclic effects of temperature (ambient temperature zero crossing) and increased salinity of the air is determined. The possibility of manufacturing axial fan housing and impellers from glass-filled polymer composite materials with a polycarbonate matrix for use in extremely low temperature conditions is shown.

Keywords: mathematical modeling, risk analysis, polymer composite materials, degradation of properties in the Arctic climate

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No.FEWN-2025-0005 Development of methods for determining materials as building structures, parts and equipment components of oil producing enterprises in the Arctic and Subarctic regions of Russia).

For citation

Ermakov S.B. Material Selection and Quality Assurance of Fans Made of Polymer Composite Materials for the Climatic Conditions of the Arctic And Subarctic Regions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 175-185. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-175-185>

Введение

К числу особенностей современного развития транспортной и промышленной инфраструктуры в северных регионах страны, в том числе предприятий добычи твердых полезных ископаемых, нефте- и газодобычи относится ряд факторов, делающих крайне привлекательным замену металлических и ряда широко применяемых полимерных конструкций при их обустройстве на более легкие и практичные – изготовленные на основе термопластичных и полимерных композиционных материалов (ПКМ). Особо остро эта проблема встала в последние пять-десять лет, когда возникла необходимость начала освоения малых и средних месторождений твердых полезных ископаемых, нефти и газа со сроками эксплуатации до десяти, а иногда пяти лет.

Неполная реализация ресурса, введение санкций на закупку нового оборудования привели к необходимости демонтажа машин и механизмов с отработанных участков и перемещения его на новые площадки для повторного использования. Это выявило необходимость создания новой техники, способной обеспечить надежную и долговечную работу при жестких режимах северной эксплуатации, уменьшающей затраты на обслуживание, монтаж, демонтаж, с минимальной массой для легкого перемещения между площадками в условиях экстремальных климатических воздействий и отсутствующей транспортной инфраструктурой в северных регионах РФ. Как показал опыт, использование значительного числа аппаратов и приборов, разработанных для средних широт, оказывается затруднено в северных условиях и требует либо модернизации, либо создания принципов

ально новых приборов, аппаратов, их несущих и корпусных конструкций [1-3].

Среди перспективных материалов для северных территорий особо следует обратить внимание на полимерные материалы (ПМ) и ПКМ. Так, термопластичные ПМ и ПКМ широко применяются в различных аппаратах, машинах и механизмах. При этом детали, изготовленные из них, могут подвергаться как агрессивному воздействию окружающей среды – экстремально низким температурам и высокой влажности воздуха, воздействиям термических циклов при многократных переходах температуры наружного воздуха «через ноль» и морского (соленого) воздуха, так и сложным эксплуатационным нагрузкам – статическим, динамическим или циклическим.

К оборудованию, требующему особого подхода при конструировании для эксплуатации в условиях северных широт, относятся электрические двигатели и оборудование, ими оснащенное – насосы, компрессоры и вентиляторы, узлы и детали которых часто изготавливают из ПМ и ПКМ.

Вентиляционные системы по данным [3, 4] играют важную роль в Арктике и используются для измерения и мониторинга скорости и направления ветра, помогают собирать данные о температуре и влажности воздуха, применяются в системах генерации электричества из возобновляемых источников энергии, что особенно важно в регионе, где доступ к традиционным источникам энергии может быть ограничен, используются в промышленности для охлаждения и вентиляции оборудования и помещений. В условиях низких температур и мерзлоты поддержание оптимальной температуры и воздухообмена является одним из требований к безопасности и эффективности эксплуатации производственных и жилых помещений.

Согласно данным [4, 5], при проектировании и конструировании деталей и узлов электрооборудования для нефтяной и газовой промышленности необходимо учесть следующие требования к электрооборудованию. Это устойчивость к низким температурам: детали должны быть способны работать при температурах, которые могут достигать -60°C и ниже; обладать защитой от обледенения, чтобы предотвратить нарастание льда на лопастях подвижных элементов; иметь способность противостоять ударным нагрузкам – как эксплуатационное динамическое нагружение, так и сильные ветры, которые характерны для Арктики; обеспечивать надежность и долговечность эксплуатации, так как доступ к обслуживанию и ремонту может быть ограничен.

Выполнение указанных требований выдвигает высокие требования к используемым материалам. Если в зоне умеренного климата детали электрооборудования в основном изготавливают из углеродистых сталей, ПМ и ПКМ (чаще всего полибутилентерефталата (ПБТ) или ПКМ на его основе), то в условиях северных широт РФ такие материалы оказыва-

ются малопригодны, так как обладают неудовлетворительной хладостойкостью и трещиностойкостью при пониженных температурах, что приводит к развиту аварийных ситуаций и выходу их из строя (рис. 1).

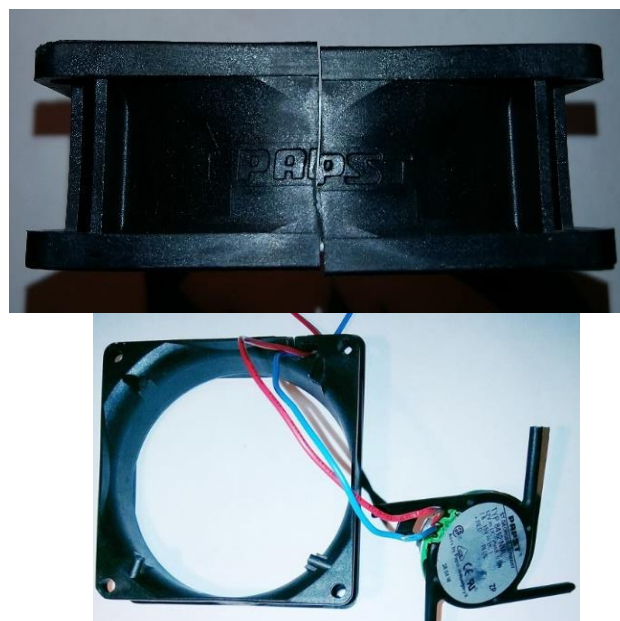


Рис. 1. Разрушение корпусов вентиляторов после эксплуатации в оборудовании контроля скорости ветра при температуре минус 43°C (время эксплуатации – 1187 и 2124 ч, материал – стеклонаполненный ПБТ)

Fig. 1. Destruction of fan housings after operation in wind speed control equipment at a temperature of minus 43°C (the operating time is 1187 and 2124 hours, the material is glass-filled PBT)

Большая часть аварийных разрушений электрооборудования арктического назначения связана с экстремально низкими температурами, высокой влажностью и засоленностью воздуха северных регионов. Повышенная агрессивность окружающей среды приводит к ускоренной коррозии металлических частей конструкции, необходимости достаточно частого профилактического ремонта, низкотемпературному охрупчиванию ПМ, намораживанию льда на вращающихся элементах. Одной из задач, стоящих перед промышленностью, является импортозамещение используемых в настоящее время вентиляторов, поставка которых из-за введенных санкций затруднена, и разработка принципиально новых типов вентиляторов для эксплуатации в Арктическом и Субарктическом регионах.

В работе решена комплексная проблема выбора материалов с необходимым уровнем морозостойкости для корпусов и крыльчаток вентиляторов и приведен анализ напряжений, возникающих в этих материалах при статическом и динамическом нагружении конструкций с различными газодинамическими и

геометрическими характеристиками. Были разработаны рекомендации по выбору материалов для подвижных и неподвижных частей вентиляторов с частотой вращения крыльчатки до 11 тыс. об⁻¹, номинальной производительностью до 350 м³/ч и полным давлением при номинальной производительности до 550 Па. При этом масса устройства не должна превышать 430 г. Условия эксплуатации конструкций – открытый воздух, в том числе прибрежных регионов Арктической зоны, с влажностью до 98%, температурой до минус 60°C.

Известно, что наиболее частыми проблемами, возникающими в ходе эксплуатации вентиляторов, являются пониженная производительность и повышенная вибрация, вызванная дефектами и трещинами, возникающими в лопастях и корпусах устройств, низкая производительность и перегревы двигателей. Согласно данным [6], использование материалов с повышенной хладостойкостью и своевременное обслуживание вентиляторов позволяет продлить срок их службы в полтора-два раза. Замеры температур корпусов и лопастей крыльчаток вентиляторов с механическими и другими дефектами в зоне северных широт показали, что такие перегревы до выхода двигателя из строя могут повысить температуру этих элементов (при температуре окружающего воздуха минус 60°C) не более чем на 10-25°C.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований были использованы стеклонаполненные (30% волокна) полимерные композиционные материалы: полибутилентерефталат – ПБТ, полиамид – ПА, поликарбонат – ПК. ПБТ – полимер с высокой степенью кристалличности (до 60%), относится к сложным насыщенным полиэфирам. В работе изучены свойства следующих ПКМ: полибутилентерефталат Bluestar PBT 110G30NA, полиамид стеклонаполненный ПА-610Л СВ30 ТУ 6-06-134-2016 и поликарбонат стеклонаполненный марки ПК-Л-СВ30 - ТУ 2253-317-09201208-93.

Известно, что одной из причин, сдерживающих применения ПКМ в технике, является изменение их свойств под действием внешних, в том числе климатических, факторов, которые связаны с целым рядом сложных химических и физических превращений, протекающих в многокомпонентных полимерных системах. Практически все ПКМ обладают низкой временной стабильностью свойств, изменяющихся под действием тепла и холода, света, напряжений, ионизационного облучения, приводящих к изменениям их структурных состояний, были выполнены путем проведения механических испытаний ПМ в соответствии с ГОСТ 14359–69 «Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования», ГОСТ 4647–2015 «Пластмассы. Методы определения ударной вязкости по Шарпи», ГОСТ 16782–92 «Пластмассы. Метод определения температуры хрупкости при ударе», ГОСТ 11262–80 «Пластмассы. Метод

испытания на растяжение», ГОСТ 26277–84 «Пластмассы. Общие требования к изготовлению образцов способом механической обработки». В ходе исследований был выполнен анализ влияния низких и повышенных температур. С этой целью подготовленные для испытаний образцы подвергались длительным захлаживанию и нагревам сроком до 2400 и 1000 ч соответственно. При определении влияния водопоглощения были подготовлены не только ударные образцы для механических испытаний, но и специализированные образцы для измерения водопоглощения в соответствии с ГОСТ 4650–80 «Пластмассы. Методы определения водопоглощения» – метод А.

Математическое моделирование условий эксплуатации вентиляторов было выполнено в программном комплексе ANSYS, также в работе использован метод FMEA-анализа разрабатываемых конструкций.

Полученные результаты и их обсуждение

На первом этапе исследований был выполнен анализ видов и последствий потенциальных несоответствий или FMEA-анализ разрабатываемых конструкций. С целью определения наиболее значимых факторов риска и их последствий были построены таблицы FMEA-анализа (они же протоколы исследования) [7, 8]. В табл. 1 и 2 приведены результаты анализа на примере оценки потенциальных несоответствий вентиляторов, изготовленных из анализируемых ПКМ.

При этом метод FMEA-анализа был доработан, а именно потребовалось учитывать дополнительный параметр, влияющий на расчет приоритетного числа риска – опасность разрушения, который, по нашему мнению, необходимо учитывать при любых исследованиях рисков, связанных с экстремальными условиями эксплуатации оборудования в зоне Арктического и Субарктического регионов, отличающихся крайне низкими климатическими температурами, высокой влажностью воздуха, сложностью в организации проведения профилактических и ремонтных работ используемого оборудования. При составлении табл. 1 были использованы как оценка группы экспертов (конструкторов вентиляторных систем и специалистов по эксплуатации оборудования в условиях ЯНАО), так и результаты длительных лабораторных исследований.

Выбор материала, пригодного для изготовления вентиляционных систем, был проведен несколькими методами. Первоначально было выполнено математическое моделирование и расчет необходимого уровня механических свойств материала вентиляторов с заданными характеристиками. С этой целью были разработаны 3D-модели объектов, определены поверхностные сетки контрольных объемов и распределения полей давлений на поверхности лопаток ротора и статора, рассчитаны поля скоростей в сечениях при удалении от вентиляторов и статическое давление за вентиляторами. На рис. 2 и 3 показаны результаты расчетов.

Таблица 1. Анализ рисков и выявление критических факторов воздействия на надёжность и долговечность вентиляторов, изготовленных из различных полимерных композиционных материалов в ходе эксплуатации оборудования в условиях Арктического и Субарктического регионов

Table 1. Risk analysis and identification of critical factors affecting the reliability and durability of fans made of various polymer composite materials during equipment operation in the Arctic and Subarctic regions

Значимость – вероятность отказа (1 – очень низкая; 10 – катастрофическая)

| Фактор риска (потеря работоспособности при воздействии фактора) | Метод | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|----|----|-----|----|----|-------|----|----|-------------------|----|----|
| | Лабораторные испытания | | | | | | | | | Экспертная оценка | | |
| | Время эксплуатации, ч | | | | | | | | | | | |
| | 1 | | | 100 | | | 1 000 | | | 50 000 | | |
| | ПБТ | ПА | ПК | ПБТ | ПА | ПК | ПБТ | ПА | ПК | ПБТ | ПА | ПК |
| Штатное нагружение | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 |
| Хладостойкость | 10 | 1 | 1 | 10 | 2 | 2 | 10 | 2 | 3 | 10 | 3 | 4 |
| Водопоглощение | 1 | 4 | 1 | 1 | 10 | 2 | 1 | 10 | 3 | 2 | 10 | 3 |
| Воздействие рабочей температуры | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Суммарное воздействие | 10 | 5 | 1 | 10 | 10 | 3 | 10 | 10 | 4 | 10 | 10 | 5 |
| Аварийный перегрев двигателя | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Вероятность возникновения (1 – очень низкая; 10–100%) | | | | | | | | | | | | |
| Фактор риска (потеря работоспособности при воздействии фактора) | Метод | | | | | | | | | | | |
| | Лабораторные испытания | | | | | | | | | Экспертная оценка | | |
| | Время эксплуатации, ч | | | | | | | | | | | |
| | 1 | | | 100 | | | 1 000 | | | 50 000 | | |
| | ПБТ | ПА | ПК | ПБТ | ПА | ПК | ПБТ | ПА | ПК | ПБТ | ПА | ПК |
| Штатное нагружение | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| Хладостойкость | 10 | 1 | 1 | 10 | 2 | 2 | 10 | 3 | 2 | 10 | 4 | 3 |
| Водопоглощение | 1 | 2 | 1 | 1 | 8 | 2 | 1 | 10 | 3 | 2 | 10 | 4 |
| Воздействие рабочей температуры | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Суммарное воздействие | 10 | 3 | 1 | 10 | 9 | 3 | 10 | 10 | 3 | 10 | 10 | 4 |
| Аварийный перегрев двигателя | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Вероятность обнаружения (1 – почти наверняка дефект будет обнаружен; 10 – практически невозможно обнаружить) | | | | | | | | | | | | |
| Фактор риска (потеря работоспособности при воздействии фактора) | Метод | | | | | | | | | | | |
| | Лабораторные испытания | | | | | | | | | Экспертная оценка | | |
| | Время эксплуатации, ч | | | | | | | | | | | |
| | 1 | | | 100 | | | 1 000 | | | 50 000 | | |
| | ПБТ | ПА | ПК | ПБТ | ПА | ПК | ПБТ | ПА | ПК | ПБТ | ПА | ПК |
| Штатное нагружение | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Хладостойкость | 5 ¹⁾ | 10 | 10 | 1 | 8 | 9 | 1 | 7 | 8 | 1 | 6 | 6 |
| Водопоглощение | 10 ²⁾ | 10 | 10 | 10 | 4 | 9 | 9 | 1 | 8 | 9 | 1 | 7 |
| Воздействие рабочей температуры | 10 ³⁾ | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 8 | 7 | 7 |
| Суммарное воздействие | 5 | 10 | 10 | 1 | 3 | 9 | 1 | 1 | 8 | 1 | 1 | 7 |
| Аварийный перегрев двигателя ⁴⁾ | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

Примечание:

- 1) Зарождение и развитие трещин в корпусе и лопаточном аппарате, разрушение конструкции.
- 2) Возникновение повышенных шумов, дисбаланса лопаточного аппарата, повышенный шум в подшипниках, снижение производительности из-за изменения геометрии и профилей лопаточного аппарата, в результате образования трещин и разрушение конструкции.
- 3) Коробление лопаточного аппарата и корпуса, повышенный шум, дисбаланс, снижение производительности.
- 4) Обычно перегрев двигателя в условиях установки вентиляторов на мобильную технику или приборы автоматизированного контроля и учета данных, расположенных на нефтегазовых месторождениях, автоматизированных постах метеонаблюдений и других технологических объектах, не обнаруживается до момента коробления или повреждения элементов устройства или выхода двигателя из строя.

Таблица 2. Результаты FMEA-анализа

Table 2. FMEA analysis results

| Фактор риска | Материал | Описание последствий | Значимость | Вероятность | Обнаружение | Оценка опасности разрушения |
|---------------------|-----------------|--------------------------------|------------|-------------|-------------|--|
| Штатное нагружение | ПБТ ПА ПК | Деградация прочностных свойств | 3 | 10 | 10 | 1 – скорость деградации за срок эксплуатации от 10 до 20%, что обычно учитывается при проектировании оборудования |
| | | Разрушение | 10 | 1 | 1 | 3 – при ошибках конструирования |
| Хладостойкость | ПБТ | Разрушение | 10 | 10 | 1 | 10 – при минус 60°C ударная вязкость ПБТ равна нулю, что приводит к разрушениям |
| | ПА | | 10 | 3 | 1 | 4 – свойства сохраняются на высоком уровне после длительного пребывания на холоде и резко падают только при насыщении водой |
| | ПК | Деградация прочностных свойств | 4 | 3 | 10 | 2 – ударная вязкость материала сохраняется на достаточно высоком уровне после длительного воздействия низких температур |
| Водопоглощение | ПБТ | Деградация прочностных свойств | 1 | 2 | 10 | 2 – материал обладает минимальной склонностью к водопоглощению |
| | ПА | Деградация прочностных свойств | 6 | 10 | 9 | 10 – высокая скорость водопоглощения приводит к снижению прочностных характеристик материала и резкому падению хладостойкости |
| | | Разрушение | 10 | 10 | 1 | |
| | ПК | Деградация прочностных свойств | 4 | 4 | 7 | 4 – умеренно склонен к водопоглощению, а сам процесс постепенно замедляется при насыщении водой поверхности материала |
| | | Разрушение | 10 | 2 | 1 | |
| Рабочая температура | ПБТ ПА ПК | Деградация прочностных свойств | 3 | 3 | 7 | 3 – снижение прочности в ходе эксплуатации учитывается при проектировании, дефекты |
| Аварийный перегрев | ПБТ ПА ПК | Деградация прочностных свойств | 3 | 3 | 7 | 3 – по данным практических наблюдений, в условиях Арктики заметного перегрева корпуса вентилятора не наблюдается вплоть до аварийного останова двигателя |
| | | Разрушение | 10 | 3 | 10 | |

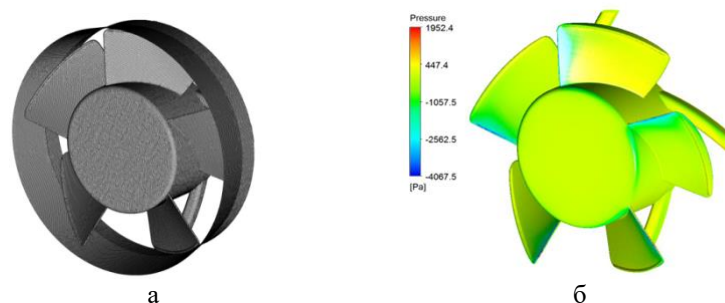


Рис. 2. Поверхностная сетка контрольных объемов (а) и распределение поля давлений на поверхности лопаток (б)

Fig. 2. The surface grid of the control volumes (a) and the distribution of the pressure field on the blades surfaces of (б)

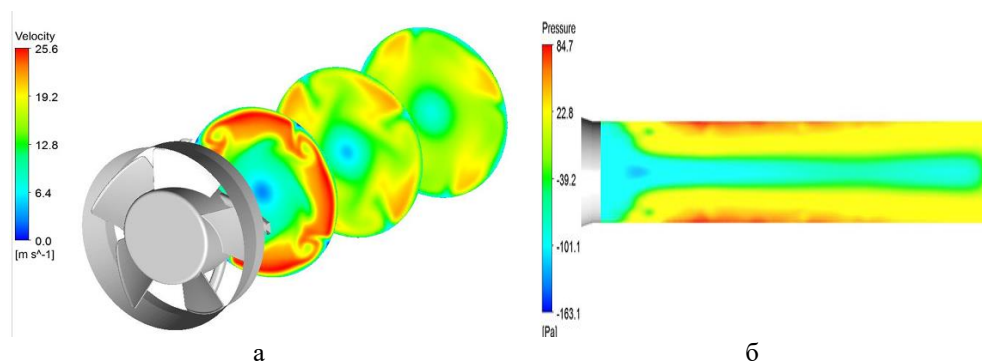


Рис. 3. Пример распределения поля скоростей в сечениях при удалении от вентилятора (а) и статического давления за вентилятором (б)

Fig. 3. An example of the distribution of the velocity field in sections at a distance from the fan (а) and the static pressure behind the fan (б)

Данные расчеты позволили создать геометрическую модель проточной части вентилятора и провести анализ полученных результатов. Оценка прочности была выполнена с помощью метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS [9]. В качестве нагрузок учитывалось влияние центробежной силы, возникающей при вращении с заданной угловой скоростью. В соответствии с прочностным расчетом конструкции было определено, что прочность материала при 20°C в ходе всего срока службы конструкции не должна опуститься ниже 100 МПа.

Также выполнен расчет влияния напряженно-деформированного состояния крыльчаток вентиляторов от давления, создаваемого воздушным потоком на лопатки, и получены диаграммы зависимости действующих напряжений от плотности различных материалов – алюминиевых сплавов АМГ6 и Д16, титанового сплава ВТ6, магниевого сплава МА1 и стеклонаполненных полимерных композиционных материалов: ПБТ, ПА и ПК.

В качестве нагрузок были приложены центробежные силы, возникающие при вращении с определенными ранее угловыми скоростями вращения. При помощи программного комплекса ANSYS были получены значения действующих в конструкции напряжений и показано, что все предполагаемые материалы удовлетворяют требованиям прочности под действием эксплуатационных нагрузок. Однако наряду с эксплуатационными нагрузками вентиляторы зачастую испытывают ударное нагружение. Известно, что практически каждое электротехническое изделие подвергается внешним воздействиям, в том числе одиночным или многократным ударами различной природы в процессе транспортировки, монтажа и эксплуатации [2, 3].

Моделирование испытаний на сопротивляемость ударным воздействиям были выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 28213-89 и ГОСТ 28215-89. В ходе расчетов был выполнен учет дополнительных масс, оказывающих инерционное воздействие – магнита и электродвигателя.

Условие прочности – отсутствие дефектов и микроразрывов конструкции, то есть напряжения, возникающие в конструкции, не должны превышать предел текучести материала. В ходе проведения расчетов был обнаружен ряд характерных точек, в которых напряжения во время испытаний оказываются максимальными, причем в этих точках условие прочности не выполняется для всех анализируемых металлических материалов. В то же время для всех ПКМ условие прочности было выполнено.

Следующей задачей, решаемой в работе, стало комплексное исследование процессов в материалах конструкций в экстремальных условиях Арктики. Основным ограничением использования ПКМ в Арктике являются требования к морозостойкости, то есть их способности сохранять заданные физико-механические и эксплуатационные свойства при температурах ниже температуры стеклования для

аморфных полимеров или ниже температуры хрупкости для кристаллизующихся полимеров [10]. Количественно морозостойкость полимерного материала определяется температурой, при снижении до которой сохраняется требуемый уровень определенного физико-механического показателя, в частности прочности, гибкости, эластичности, либо расчетным коэффициентом отношения показателя физико-механических свойств при пониженной и комнатной температурах [10, 11].

Для оценки возможности использования перечисленных в табл. 1 и 2 ПКМ для вентиляторов северного исполнения была исследована длительная морозостойкость и стойкость в условиях низко- и высокотемпературного воздействия на ПКМ в условиях, максимально имитирующих условия эксплуатации оборудования. Так как результаты математического моделирования показали возможность использовать все три ПКМ, были проведены испытания стеклонаполненных ПБТ, ПА и ПК.

В табл. 3 приведены результаты оценки уровня водопоглощения образцов ПКМ. Максимальный уровень водопоглощения определяется у ПА, минимальный – у ПБТ.

Исследованиями ударной вязкости ПКМ (табл. 4) показано, что динамические свойства ПКМ формируются за счет вязкости матрицы [12] – разрушение ПБТ при минус 60°C носит абсолютно хрупкий характер и его ударная вязкость по Шарпи с надрезом при минус 60°C близка к нулю; хотя при комнатной температуре в структуре излома материала были отмечены отдельные участки вязкого разрушения матрицы.

Таблица 3. Водопоглощение образцов ПКМ
Table 3. Water absorption of PCM samples

| Материал | Водопоглощение, %, за период, ч | | | |
|----------|---------------------------------|------|------|------|
| | 12 | 24 | 36 | 48 |
| ПА | 1,57 | 2,64 | 2,82 | 3,04 |
| ПБТ | 0,04 | 0,06 | 0,07 | 0,08 |
| ПК | 0,16 | 0,21 | 0,24 | 0,25 |

Таблица 4. Средние и минимальные значения ударной вязкости образцов ПКМ в исходном состоянии, после насыщения водой в течение 24 ч

Table 4. Average and minimum impact strength values of PCM samples in the initial state after water saturation for 24 hours

| Материал | Температура, °C | Средняя ударная вязкость $KCV_{\text{сред}}$, МДж/м ² | | Минимальная ударная вязкость $KCV_{\text{мин}}$, МДж/м ² | |
|----------|-----------------|---|----------------------|--|----------------------|
| | | Исходное состояние | После водопоглощения | Исходное состояние | После водопоглощения |
| ПА | 20 | 10,4 | 4,6 | 9,0 | 3,1 |
| | -60 | 8,8 | 1,2 | 6,1 | 0,7 |
| ПБТ | 20 | 6,0 | 6,0 | 5,3 | 4,8 |
| | -60 | 0,2 | 0,1 | 0 | 0 |
| ПК | 20 | 9,9 | 8,6 | 9,3 | 5,1 |
| | -60 | 8,0 | 7,6 | 5,9 | 5,0 |

Анализом изломов показано, что при нормальных температурах магистральная трещина развивается по матрице материала, огибая волокна наполнителя. В изломах образцов ПБТ был обнаружен достаточный объем вязкого ямочного отрыва, при пониженных температурах доля вязкой составляющей в изломах снижается практически до нуля, хрупкая трещина развивается по всей массе материала, разрушая как матрицу, так и нити наполнителя, раскалывая их или вырывая нити из тела матрицы.

Механизм разрушения образцов ПА в исходном состоянии соответствует вязкому и квазихрупкому механизму во всем температурном диапазоне, после насыщения образцов водой механизм разрушения смещается в сторону хрупкого разрушения, это особо заметно при минус 60°C. Испытания показали, что ПА и самая популярная для изготовления узлов и деталей конструкций электротехнического назначения ПБТ-матрица не соответствуют требованиям, предъявляемым к материалам для вентиляторов, предназначенных для эксплуатации в условиях открытого воздуха Арктики.

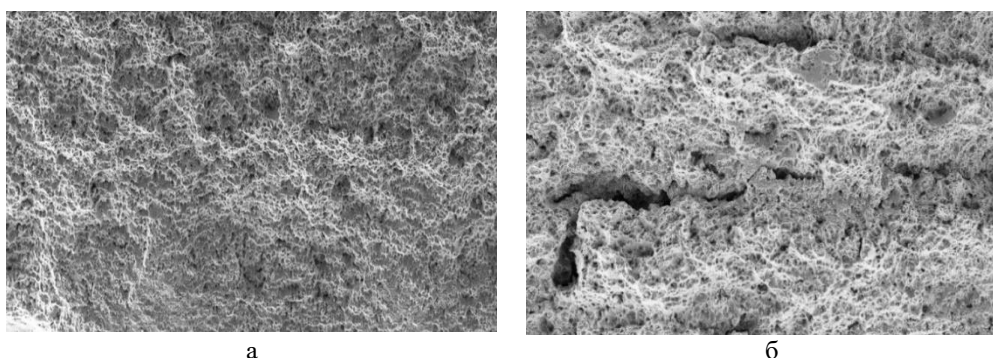
Механизм разрушения образцов ПК (рис. 4) вязкий – вне зависимости от температуры и воздействия влаги. Главным различием вида разрушения образцов полимера и ПКМ на базе ПК является отсутствие следов хрупкой магистральной трещины на поверхности изломов, то есть наполнитель позволил исключить самый главный недостаток поликарбонатов – нулевую трещиностойкость материала.

По результатам проведенных исследований было определено, что единственным из изученных ПКМ материалом, пригодным для изготовления деталей вентиляторов, является стеклонанополненный поликарбонат. Механические свойства этого материала были изучены в условиях длительных выдержек при повышенных и пониженных температурах, когда образцы перед проведением испытаний были выдержаны в термостате и холодильной камере при заданных тем-

пературах, а затем испытаны на одноосное статическое растяжение (табл. 5). В таблице также приведен показатель Y – коэффициент, рекомендованный к использованию при проведении прочностных расчетов полимеров и учитывающий особенности их поведения при длительной эксплуатации [13, 14]. Коэффициент Y рассчитывается как отношение фактического значения прочности материала к его прочности при 23°C, что позволяет более полно учитывать роль температурного фактора эксплуатации.

Как следует из данных табл. 5, старение при температуре 70°C соответствует условиям эксплуатации оборудования и весьма незначительно сказывается на прочности ПКМ, повышение температуры старения до 95°C (экспертная оценка возможной температуры перегрева корпусных элементов) также практически не изменяет прочностных свойств ПК. Захлаживание в течение 2400 ч приводит к падению прочности всего на 5–18 МПа и легко прогнозируется на более длительные времена эксплуатации, насыщение образцов ПК водой также не оказывает существенного влияния на прочность при разрыве материала.

Однако, как известно, оборудование в Арктике при эксплуатации испытывает воздействие еще ряда климатических факторов, главенствующими из которых являются термоциклические воздействия перехода через ноль и повышенный уровень соли в воздухе прибрежных арктических зон. Испытания воздействия соляного тумана были выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 30630.2.5–2013. Общее время пребывания образцов в соляном тумане составляло от 1 до 30 суток. Термоциклические воздействия были осуществлены путем быстрого (не более 5 с) перемещения образца между двумя климатическими камерами, одна из которых была разогрета до 70°C, вторая охлаждена до минус 60°C. Влажность воздуха в камерах поддерживалась на уровне 95–98%. Результаты механических испытаний показаны в табл. 6.



а

б

Рис. 4. Поверхности разрушения образцов ПК после ударного воздействия при минус 60°C: а – в исходном состоянии; б – после насыщения водой, $\times 100$

Fig. 4. The fracture surfaces of PC samples after impact at minus 60°C: a is in the initial state; b is after water saturation, $\times 100$

Таблица 5. Механические характеристики образцов ПК старения при 70, 95°C и захлаживания при -60°C
 Table 5. Mechanical characteristics of PC samples ageing at 70°C and 95°C and cooling at -60°C

| Состояние | $T_{исп}, ^\circ C$ | Прочность при разрыве s_{pp}, MPa | γ | Относительное удлинение $\epsilon_{pp}, \%$ |
|---|---------------------|-------------------------------------|----------|---|
| Исходное состояние | 23 | 134 | | 5,2 |
| | 20 | 134 | 1,0 | 5,1 |
| | -60 | 161 | 1,20 | 3,9 |
| Старение 200 ч, 70°C ¹⁾ | 20 | 131 | 0,98 | 5,0 |
| | -60 | 160 | 1,19 | 3,7 |
| Старение 1000 ч, 70°C | 20 | 128 | 0,96 | 4,8 |
| | -60 | 154 | 1,15 | 3,4 |
| Старение 200 ч, 95°C ²⁾ | 20 | 130 | 0,98 | 4,9 |
| | -60 | 160 | 1,19 | 3,5 |
| Старение 1000 ч, 95°C | 20 | 126 | 0,95 | 4,7 |
| | -60 | 152 | 1,14 | 3,2 |
| Захлаживание 200 ч, - 60°C | 20 | 134 | 1,0 | 5,1 |
| | -60 | 158 | 1,19 | 3,9 |
| Захлаживание 2400 ч, - 60°C | 20 | 129 | 0,97 | 3,8 |
| | -60 | 148 | 1,10 | 3,4 |
| Водопоглощение 24 ч + захлаживание 200 ч, -60°C 200 ч ³⁾ | 20 | 132 | 0,99 | 4,4 |
| | -60 | 147 | 1,10 | 3,4 |
| Водопоглощение 24 ч + захлаживание 1000 ч, - 60°C | 20 | 127 | 0,95 | 4,0 |
| | -60 | 144 | 1,07 | 3,2 |

Примечание:

- 1) Уровень рабочих (штатных) температур эксплуатации.
- 2) Экспертная оценка возможного уровня нагрева материалов конструкции при перегреве двигателя.
- 3) Уровень водопоглощения после 24 ч – 0,21%.

Таблица 6. Влияние термоциклирования и соляного тумана на механические свойства образцов
 Table 6. Effect of thermal cycling and salt mist on the mechanical properties of the samples

| $T, ^\circ C$ | Термоциклы | | | | | Соляной туман | | | | |
|---------------|------------|---------------|----------|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------|----------|---------------------|-------------------------|
| | Цикл, шт. | s_{pp}, MPa | γ | $\epsilon_{pp}, \%$ | KCV, кДж/м ² | Время пребывания, ч | s_{pp}, MPa | γ | $\epsilon_{pp}, \%$ | KCV, кДж/м ² |
| 20 | 10 | 133 | 0,99 | 5,2 | 9,6 | 12 | 131 | 0,98 | 5,1 | 9,7 |
| -60 | | 161 | 1,19 | 5,1 | 7,8 | | 157 | 1,17 | 4,4 | 7,8 |
| 20 | 50 | 124 | 0,93 | 4,6 | 9,3 | 24 | 127 | 0,95 | 4,6 | 9,4 |
| -70 | | 149 | 1,11 | 3,8 | 7,3 | | 149 | 1,11 | 3,8 | 7,3 |
| 20 | 100 | 120 | 0,90 | 4,4 | 9,0 | 96 | 124 | 0,93 | 4,3 | 9,0 |
| -70 | | 146 | 1,09 | 3,7 | 7,1 | | 141 | 1,05 | 3,6 | 6,9 |
| 20 | 200 | 114 | 0,85 | 3,9 | 8,5 | 720 | 112 | 0,84 | 3,5 | 8,3 |
| -70 | | 137 | 1,02 | 3,3 | 6,5 | | 126 | 0,94 | 2,7 | 6,0 |

Как следует из приведённых в табл. 5 и 6 данных, влияние внешних климатических факторов хотя и сказывается на свойствах ПКМ, изготовленного путем введения в поликарбонатную матрицу мелкорубленых нитей стекловолокна, тем не менее не приводит к катастрофическому разрушению материала и изготовленных из него конструкций. Минимальное значение прочности при разрыве, полученное в ходе испытаний, составило 112 МПа, что значительно выше полученного при прочностном расчете конструкции уровня требуемой прочности – 100 МПа. Сохранение вязкого механизма отрыва при динамическом разрушении ударных образцов при температуре минус 60°C указывает на достаточный запас трещиностойкости данного ПКМ. Таким образом, была решена задача выбора отечественного материала с мини-

мальной плотностью и механическими свойствами, обеспечивающими безопасную эксплуатацию вентиляторов для северных территорий с заданными технологическими параметрами.

Заключение

1. Математическое моделирование условий эксплуатации и особенностей нагружения вентиляторов, массогабаритные размеры которых строго определены технологическими требованиями эксплуатации и особенностями климатических условий в Арктической зоне РФ, показало, что наиболее перспективным направлением является изготовление таких изделий из полимерных композиционных материалов, обладающих малой плотностью и высоким уровнем удельной прочности.

2. Выполнен анализ рисков и последствий потенциальных несоответствий вентиляторов. Показано, что при выполнении анализа необходимо ввести учет дополнительного фактора – опасности разрушения конструкции. Методом FMEA удалось решить комплексную задачу по описанию факторов риска, влияющих на эксплуатацию вентиляторов, изготовленных из ПКМ.

3. Показано, что использование наиболее распространенных в условиях средних широт ПКМ на основе полиамидов и полибутилентерефталатов в условиях экстремально низких температур и высокой влажности воздуха могут приводить к развитию аварийных ситуаций из-за резкого снижения деформационной способности материалов. В то же время подтверждена возможность применения полимерных композиционных материалов на основе поликарбоната, свойства которых остаются на необходимом уровне для безопасной и надежной эксплуатации узлов и деталей различного назначения в условиях климатического воздействия Арктического климата.

Список источников

1. Ермаков Б.С., Швецов О.В., Ермаков С.Б. Особенности применения полимерных композиционных материалов при обустройстве нефтегазовых месторождений Арктического пояса // Глобальная энергия. 2025. Т. 31. № 1. С. 112–121.
2. Горбунов В.П. Решение проблем адаптации и эксплуатации систем жизнеобеспечения воздушных судов западного производства в условиях экстремально низких температур Крайнего Севера, Сибири и Арктики // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. №218. С. 50–53.
3. Рухлинский В.М., Горбунов В.П. Решение проблем эксплуатации ВС иностранного производства в условиях экстремально низких температур // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития (1-2 ноября 2012 г.): тезисы докладов III Междунар. науч.-практ. конф. Ульяновск: УлГУ, 2012. С. 40–42.
4. Муравьев К.А. Особенности эксплуатации оборудования нефтяной и газовой промышленности в условиях Крайнего Севера и Арктики. Surgut: TIU, 2023. 41 с.
5. Арктика: вентиляторы. URL: igp-tc.ru/arktika-ventilyatory.html
6. Description 2018 ASHRAE Handbook—Refrigeration URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2018-ashrae-handbook-refrigeration>.
7. Ключков Ю.С., Коваль Н.О. Развитие метода развертывания функций качества на этапе проектирования продукции // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26. № 4–3 (120). С. 428–436.
8. Ключков Ю.С., Фокин Г.А., Сыровацкий О.В. Учет неопределенности при проведении процедуры FMEA-анализа // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23, № 6(104). С. 26–32.
9. Иванов И.И., Чеповский А.Е. Программные средства обработки результатов расчетов в инженерных пакетах Ansys CFX и Abaqus для высокопроизводительных вычислительных установок. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 193 с.
10. Кулезнёв В.Н., Шершнёв В.А. Химия и физика полимеров. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колосс, 2007. 367 с.
11. Бартенев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров / под ред. д-ра физ.-мат. наук Ельяшевича А.М. Л.: Химия, 1990. 432 с.
12. Мосинок В.Н. Теплоустойчивое эпоксидно-бисмалеимидное связующее с повышенной трещиностойкостью для изготовления полимерных композиционных материалов по безавтоклавным технологиям формования: дис. ... канд. техн. наук. Обнинск: АО «Обнинское производственное предприятие «Технология» ГНЦ РФ, 2024. 116 с.
13. Рекомендации по проектированию и расчету конструкций с применением пластмасс / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1969. 149 с.
14. Влияние температуры на физико-механические свойства монолитного поликарбоната / Авадеев К.В., Бобров В.В., Тучин М.А., Домашова Е.В., Кудрявцев Н.А., Скакун П.В. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. №20(1). С. 73–83.

References

1. Ermakov B.S., Shvetsov O.V., Ermakov S.B. Features of the use of polymer composite materials in the development of oil and gas fields in the Arctic zone. *Globalnaia energiya* [Global energy]. 2025;31(1):112-121. (In Russ.)
2. Gorbunov V.P. Solving the problems of adaptation and operation of Western-made aircraft life support systems in the extremely low temperatures of the Far North, Siberia and the Arctic. *Nauchnyi vestnik MGTU GA* [Scientific bulletin of MSTU CA]. 2015;(218):50-53. (In Russ.)
3. Rukhlinskii V.M., Gorbunov V.P. Solving the problems of operating foreign-made aircraft at extremely low temperatures. *Sistemy upravleniia zhiznennym tsiklom izdelii aviatsionnoi tekhniki: aktualnye problemy, issledovaniia, opyt vnedreniia i perspektivy razvitiia: tezisy dokladov III Mezhdunar. nauch.-praktich. konf* [Life cycle management systems for aviation technology products: current issues, research, implementation experience and development prospects: abstracts of the III International Scientific and Practical Conference]. Ulyanovsk: Ulsu, 2012, pp. 40-42. (In Russ.)
4. Muravev K.A. *Osobennosti ekspluatatsii oborudovaniia nefianoi i gazovoi promyshlennosti v usloviakh Krainego Severa i Arktiki* [Features of operation of oil and gas industry equipment in conditions of The Far North and the Arctic]. Surgut: TIU Publishing House, 2023, 41 p. (In Russ.)
5. *Arktika: ventilyatory* [Arctic: air mover]. Available at: igp-tc.ru/arktika-ventilyatory.html
6. Description 2018 ASHRAE Handbook-Refrigeration. Available at: <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2018-ashrae-handbook-refrigeration>.
7. Klovchikov Yu.S., Koval N.O. Development of a method for deploying quality functions at the product design stage. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of

- the Russian Academy of Sciences]. 2024;26(4-3(120)):428-436. (In Russ.)
8. Klochkov Yu.S., Fokin G.A., Syrovatskii O.V. Consideration of uncertainty during the FMEA analysis procedure *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2021;(23(6(104))):26-32. (In Russ.)
 9. Ivanov I. I., Chepovskii A. E. Programmnye sredstva obrabotki rezultatov raschetov v inzhenernykh paketakh Ansys CFX i Abaqus dlia vysokoproizvoditelnykh vychislitelnykh ustanovok [Software tools for processing calculation results in the engineering packages Ansys CFX and Abaqus for high-performance computing units]. Moscow: MSTU n.a. N.E. Bauman Publishing House, 2014, 193 p. (In Russ.)
 10. Kuleznev V.N., Shershnev V.A. *Khimiia i fizika polimerov* [Chemistry and physics of polymers]. Moscow: Koloss, 2007, 367 p. (In Russ.)
 11. Bartenev G.M., Frenkel S.Ya. *Fizika polimerov* [Physics of polymers]. Leningrad: Khimiia, 1990, 432 p. (In Russ.)
 12. Mosiyuk V.N. Teplostoikoe epoksibismaleimidnoe sviazuiushchee s povyshennoi treshchingostoikostiu dlia izgotovleniia polimernykh kompozitsionnykh materialov po bezavtoklavnym tekhnologiiam formovaniia: dis. ... kand. tekhn. nauk [Heat-resistant epoxybismaleimide binder with increased crack resistance for the manufacture of polymer composite materials using autoclave-free molding technologies. PhD dissertation]. Obninsk, 2024. 116 p.
 13. *Rekomendatsii po proektirovaniu i raschetu konstrukttsii s primeneniem plastmass* [Recommendations for the design and calculation of structures using plastics]. Moscow: Central Research Institute of Building Constructions named after V.A. Kucherenko, 1969, 149 p. (In Russ.)
 14. Avadeev K.V., Bobrov V.V., Tuchin M.A., Domashova E.V., Kudriavtsev N.A., Skakun P.V. Influence of temperature on the physical and mechanical properties of monolithic polycarbonate. *Stroitelnaia mekhanika inzhenernykh konstrukttsii i sooruzhenii* [Construction mechanics of engineering structures]. 2024;(20(1)):73-83. (In Russ.)

Поступила 26.08.2025; принята к публикации 01.09.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 26/08/2025; revised 01/09/2025; published 25/12/2025

Ермаков Сергей Борисович – кандидат технических наук, директор центра технологических инициатив, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: ermakovsb@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-4243-0984

Sergey B. Ermakov – PhD(Eng.), Director of the Center for Technological Initiatives, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: ermakovsb@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-4243-0984