

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ / MATERIALS SCIENCE AND CHEMICAL TECHNOLOGIES

УДК 678.743.41:620.178.162

EDN: YSVJCQ

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-1-164-175>



Оригинальная статья

Низкотемпературные триботехнические испытания ПТФЭ-композигов, модифицированных углеродными наполнителями

Т. А. Исакова[✉], П. Н. Петрова, М. А. Маркова, А. Л. Федоров

Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

[✉]tatyana_issakova@mail.ru

Аннотация

Процессы изнашивания полимерных композиционных материалов (ПКМ) в условиях отрицательных температур остаются недостаточно изученными. В связи с этим проведение триботехнических исследований при низких температурах полимерных композитов вызвано необходимостью оценки их работоспособности в регионах с холодным климатом. Результаты таких исследований будут способствовать формированию практических решений для создания новых морозостойких композитов технического назначения и повышению надежности и безопасности эксплуатации техники в условиях низких климатических температур. Целью данной работы является изучение триботехнических свойств ПКМ при комнатной и отрицательных температурах. В работе исследованы ПКМ на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) с 5 мас.% нановолокон (УНВ-02) и микроволокон (УВИС-АК-П), полученные двумя способами: простым смешением в лопастном смесителе и с применением совместной механоактивации 1/2 части полимера с наполнителем в планетарной мельнице. Триботехнические испытания проведены в испытательной камере «КТХ-150» (ООО «Технология», Россия), а также вне помещения на открытом воздухе с использованием экспериментальной установки «Трибометр-1» (схема трения «палец–диск»), разработанной в ИПНГ СО РАН. Показано, что при –30 °С скорость массового изнашивания снижается у ПТФЭ в 4,5 раза, у композитов с УНВ-02 в 1,4–1,7, у композита с УВИС-АК-П – в 1,5 раза. Коэффициент трения несколько повышается у всех ПКМ, за исключением исходного полимера. Повышение износостойкости связано с «замораживанием» структуры композитов в процессе трения при низкой температуре, приводящей к повышению твердости. Установлено, что стационарный режим трения композитов при отрицательной температуре достигается быстрее в камере, чем при комнатной температуре и на открытом воздухе. Полученные результаты будут способствовать развитию арктического материаловедения, в частности по вопросам изучения поведения полимерных материалов в условиях холодного климата.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, полимерные композиционные материалы, низкотемпературные испытания, коэффициент трения, износостойкость

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (№ FWRS-2025-0045, № 125121014137-4; FWRS-2026-0027, № 126022417885-6) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ «ЯНЦ СО РАН».

Для цитирования: Исакова Т.А., Петрова П.Н., Маркова М.А., Федоров А.Л. Низкотемпературные триботехнические испытания ПТФЭ-композигов, модифицированных углеродными наполнителями. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(1):164–175. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-1-164-175> EDN: YSVJCQ

Low-temperature tribological testing of PTFE composites modified with carbon fillers

Tatyana A. Isakova✉, Pavlina N. Petrova, Marfa A. Markova, Andrey L. Fedorov

Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Yakutsk, Russian Federation

✉tatyana_issakova@mail.ru

Abstract

Wear processes in polymer composite materials (PCMs) at subzero temperatures remain insufficiently studied. Therefore, tribological investigations of polymer composites under low-temperature conditions are essential for evaluating their performance in cold climates. The findings from such studies will support the development of new frost-resistant composite materials and contribute to safer, more reliable equipment operation in cold environments. This study aims to investigate the tribological properties of PCMs at room and subzero temperatures. The materials examined were polytetrafluoroethylene (PTFE)-based composites containing 5 wt.% nanofibers (UNV-02) and microfibers (UVIS-AK-P). These were prepared using two methods: simple mixing in a paddle mixer and combined mechanical activation of half the polymer with filler in a planetary mill. Tribological tests were conducted in a KTX-150 thermal chamber (Technology LLC, Russia) and outdoors using a Tribometer-1 experimental setup (pin-on-disk configuration) developed at the Institute of Oil and Gas Problems SB RAS. At -30°C , the mass wear rate decreased by a factor of 4.5 for PTFE, by 1.4–1.7 times for UNV-02 composites, and by 1.5 times for the UVIS-AK-P composite. The coefficient of friction increased slightly for all PCMs except the original polymer. The enhanced wear resistance is attributed to the “freezing” of the composite structure during friction at low temperatures, which leads to increased hardness. Steadystate friction of the composites at subzero temperatures was achieved more rapidly in the chamber than at room temperature or in open air. The results obtained will contribute to the advancement of Arctic materials science, particularly in understanding the behavior of polymeric materials in cold climates.

Keywords: polytetrafluoroethylene, polymer composite materials, low-temperature tests, coefficient of friction, wear resistance

Funding. This study was conducted within the framework of state assignments from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FWRS-2025-0045, No. 125121014137-4; No. FWRS-2026-0027, No. 126022417885-6). The research used scientific equipment from the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Center “The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”.

For citation: Isakova T.A., Petrova P.N., Markova M.A., Fedorov A.L. Low-temperature tribological testing of PTFE composites modified with carbon fillers. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(1):164–175. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-1-164-175> EDN: YSVJQC

Введение

Арктическое материаловедение представляет собой важную и активно развивающуюся область науки, нацеленную на изучение характеристик материалов в экстремальных условиях Севера и Арктики [1, 2]. Под Арктикой понимаются все регионы холодного климата независимо от географического положения: северные побережья Евразии и Северной Америки, северные части Тихого и Атлантического океанов и т. д. При этом Республика Саха (Якутия) занимает почти всю северо-восточную часть Азии. Согласно климатическому районированию по ГОСТ 16350–80, территория Крайнего Севера Якутии относится к районам с очень холодным климатом, что ха-

рактеризуется температурным режимом с пиковыми значениями температуры до -60°C в зимний период и до $+35^{\circ}\text{C}$ в летний период с быстро нарастающими среднесуточными температурами весной и понижающимися осенью. Среднегодовая температура составляет -17°C , средняя температура холодного времени года -30°C , а теплого периода $+15^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность воздуха колеблется до 73–79 % в холодное время года и до 45–50 % – в теплое. В настоящее время в этих районах ведутся интенсивные горные работы на месторождениях полезных ископаемых, на которых эксплуатируются разнообразная техника и оборудование для бесперебойной работы, что предполагает изготовление послед-

них из материалов, приспособленных (адаптированных) к данным климатическим условиям [3]. Целый ряд факторов, характерных для этих регионов, таких как низкие температуры, высокая влажность, обледенение и специфические механические нагрузки, требует от материалов особых свойств и надежности при эксплуатации.

В связи с этим, перед тем как материал будет запущен в производство и использован, ему необходимо пройти всесторонние испытания. Важным аспектом является изучение поведения материала под воздействием внешних факторов: высоких и низких температур, влажности, агрессивной среды, механических нагрузок, биологического воздействия и пр. Эти исследования нацелены на установление закономерностей влияния негативных факторов на эксплуатационные свойства [4].

Результаты исследований позволяют не только оценить возможность применения материала, но и уточнить условия и срок его эксплуатации. Исследования и разработки эффективных триботехнических полимерных композиционных материалов (ПКМ) в регионах Арктики и Севера важны для снижения потерь на трение и износ в технических системах. Анализ множества публикаций свидетельствует, что полимерные материалы на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) особенно эффективны для повышения надежности и долговечности узлов трения благодаря химической стойкости, широкому рабочему диапазону температур и способности работать без смазки, что связано с уникальными свойствами полимерной матрицы ПТФЭ [5–16]. Следует отметить, что параметры трения и износа не являются внутренними характеристиками материала, они в большей степени зависят от условий испытаний и компоновки трибологической системы с конкретной геометрией контакта [17]. При этом сильная зависимость полимерных материалов от температуры, скорости деформации и чувствительности процесса их разрушения делают изучение процессов их изнашивания гораздо более сложным по сравнению с металлами [18, 19].

В связи с этим изучение процессов трения полимерных материалов и их количественная оценка путем испытания ПКМ не только при комнатной температуре, но и при низких температурах, является актуальной задачей, имеющей очевидные практические применения для разработки ПКМ с заданными свойствами.

Материалы и методы

В работе исследованы ПКМ на основе ПТФЭ, модифицированные углеродными волокнистыми наполнителями (УВ) различного типа и размера частиц. В качестве наполнителей выбраны микро- и нановолокнистые углеродные материалы:

- углеродные нановолокна (УНВ) с маркировкой УНВ-02 производства Института катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, полученные методом каталитического пиролиза двух типов смесей углеводородов (C_2H_4 , C_3+C_4) на никель-медных катализаторах [20];

- углеродные дискретные активированные гидратцеллюлозные углеродные волокна марки УВИС-АК-П производства ООО «НПЦ «УВИКОМ» (Россия) [21].

При создании ПКМ для улучшения их триботехнических и механических характеристик, помимо выбора типа и количества вводимого наполнителя, важное значение имеет технология введения наполнителей в полимер, включающая различные активационные технологии энергетического воздействия как на этапе подготовки компонентов композита, так и в процессе их формирования. Использование подобных технологий позволяет добиться более равномерного распределения частиц наполнителя в полимере и улучшить межфазное взаимодействие на границе раздела фаз полимер–наполнитель. Для сравнения в работе были рассмотрены два технологических приема при получении ПКМ: 1) смешение компонентов в лопастном смесителе (технология № 1); 2) смешение смесевой композиции, полученной совместной механоактивацией 1/2 части полимера с наполнителем в планетарной мельнице «Pulverisette-5» при скорости вращения барабанов 400 об./мин с остальной частью полимера (технология № 2).

Образцы в виде цилиндров получали путем холодного прессования и термообработки (спекания) в муфельной печи по стандартной технологии переработки ПТФЭ.

Триботехнические исследования проводили на экспериментальной установке «Трибометр-1» по схеме трения «палец–диск», разработанной в ИПНГ СО РАН. Преимуществом этой установки является компактность размеров и мобильность, позволяющие проводить испытания не только при комнатной температуре, но и при низких температурах в испытательной камере тепла-холода «КТХ-150» (ООО «Технология», Россия) и вне помещения на открытом воздухе.

Таблица 1

**Зависимость деформационно-прочностных и триботехнических характеристик ПКМ
от технологии их получения**

Table 1

**Dependence of the deformation-strength and tribological properties
of PCMs on their production technology**

Состав	Технология	σ_p , МПа	ε_p , %	E_p , МПа	$\sigma_{сж}$, МПа
ПТФЭ	—	20	310	470	23
ПТФЭ+5 % УНВ-02	№ 1	9	35	335	27
	№ 2	18	245	538	26
ПТФЭ+5 % УВИС-АК-П	№ 1	14	117	435	26
	№ 2	20	354	514	31

Примечание. σ_p – предел прочности при растяжении; ε_p – относительное удлинение при разрыве; E_p – модуль упругости при растяжении; $\sigma_{сж}$ – предел прочности при сжатии при деформации 25 %.

Note. σ_p – tensile strength, МПа; ε_p – elongation at break, %; E_p – tensile modulus of elasticity, МПа; $\sigma_{сж}$ – compressive strength at 25 % strain, МПа.

Схема трения «палец–диск» имитирует работу пар трения при различных скоростях относительного перемещения сопрягаемых поверхностей (подшипник линейного трения), и контакт поверхностей трения деталей происходит по площади. При этом полимерный образец «палец» неподвижный, а контртело «диск» совершает вращательное движение вокруг своей оси. Задаваемая машиной нагрузка составляла 160 Н (2 МПа). Преимущество такой схемы трения состоит в том, что после окончания приработочного периода трения сопрягаемых деталей контактная нагрузка меняется незначительно. После окончания испытаний легко можно определить объем и скорость изнашивания исследуемых образцов. Однако при этом часто требуется очень длительное время приработки из-за трудности выравнивания испытуемого образца (пальца-столбика) строго перпендикулярно к контртелу (диску).

Триботехнические испытания ПКМ проводили при комнатной температуре и разных температурах (–30, +40, +60 °С) в испытательной камере тепла-холода «КТХ-150» (ООО «Технология», Россия), а также вне помещения на открытом воздухе. Образцы взвешивали на аналитических весах Vibra HTR 220 SE с шагом до 0,0001 г. Поверхности трения образцов исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-6460LV (JEOL, Япония) с системой энергодисперсионного микроанализа Oxford INCAEnergy (Oxford Instruments Analytical, Великобритания) и оптического микроскопа Альтами Полар

312 (Альтами, Россия). Для определения температуры в контактной зоне использовали термопару ТХА тип К и тепловизор NEC Thermo tracer TH7102, фиксирующий температуру во внешних точках.

Результаты и обсуждение

Ввиду большого числа параметров, влияющих на трение и износ, целесообразно соответствующие испытания проводить в несколько этапов, в первую очередь проводили испытания деформационно-прочностных показателей материалов. Как видно из табл. 1, использование технологии № 2 при получении ПКМ приводит к повышению значений деформационно-прочностных показателей по сравнению с композитами, полученными по технологии простого смешения.

Известно, что при эксплуатации при низких температурах полимерные материалы приобретают хрупкость и теряют свои исходные физико-механические характеристики [22]. В связи с этим важной задачей при наполнении полимера является сохранение или хотя бы незначительное снижение деформационно-прочностных показателей ПКМ по сравнению с аналогичными показателями исходного полимера, так как более высокие значения физико-механических характеристик ПКМ при комнатной температуре способствуют лучшему сохранению этих характеристик при низких температурах за счет большого запаса прочности и пластичности, а также медленного достижения критической хрупкости [22]. Кроме этого, улучшение механических свойств по-



Рис. 1. Экспериментальная установка «Трибометр-1», разработанная в ИПНГ СО РАН: а – расположение в испытательной камере тепла-холода «КТХ-150»; б – проведение исследования в испытательной камере; в – внешний вид экспериментальной установки; г – передняя панель «Трибометра-1»

Fig. 1. Experimental setup “Tribometer-1” developed at the Institute of Oil and Gas Problems SB RAS: а) placement in the “КТН-150” thermal testing chamber; б) conducting experiments in the chamber; в) external view of the experimental setup; г) front panel of “Tribometer-1”

лимерных материалов повышает сопротивление материала к пластической деформации и растрескиванию при трении, так как замедляются образование и распространение трещин на поверхности износа [23–27], которые интенсифицируются при эксплуатации полимерных материалов в условиях низких и резких перепадов температур.

Для выявления зависимости триботехнических показателей ПКМ от температуры проведены

сравнительные испытания ПКМ при комнатной температуре и $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в испытательной камере тепла-холода «КТХ-150» (ООО «Технология», Россия) на экспериментальной установке «Трибометр-1» (рис. 1).

В табл. 2 приведены результаты триботехнических исследований ПТФЭ и ПКМ на его основе при комнатной температуре ($+21\text{--}23\text{ }^{\circ}\text{C}$) и температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Условия трения: нагрузка 160 Н,

**Зависимость триботехнических показателей ПТФЭ и ПКМ на его основе
от температуры окружающей среды на экспериментальной установке «Трибометр-1»**

Table 2

**Dependence of tribological indicators of PTFE and PTFE-based PCMs
on ambient temperature, measured with the Tribometer-1 experimental setup**

Состав	Комнатная температура (+21–23 °С)		–30 °С	
	I, мг/ч	<i>f</i>	I, мг/ч	<i>f</i>
ПТФЭ	212	0,21	47,59	0,15
ПТФЭ+5 мас.% УНВ-02 технология № 1	3,79	0,21	2,33	0,22
ПТФЭ+5 мас.% УНВ-02 технология № 2	3,17	0,21	2,17	0,22
ПТФЭ+5 мас.% УВИС-АК-П технология № 2	1,40	0,14	0,95	0,20

скорость скольжения 0,2 м/с, время испытания 3 ч. Перед началом испытания проводили приработку ПКМ до формирования фактической площади контакта сопрягаемых деталей, составляющей не менее 2/3 номинальной площади контакта образца с контртелом. Далее взвешивали образцы на аналитических весах Vibra HTR 220 SE с шагом до 0,0001 г. Данную массу образцов принимали как начальную.

Как видно из табл. 2, скорость массового изнашивания при температуре –30 °С снизилась у ПТФЭ в 4,5 раза, у композитов с УНВ-02 – в 1,4–1,7, у композита с УВИС-АК-П – в 1,5 раза по сравнению с показателем при комнатной температуре. Коэффициент трения несколько повысился у всех ПКМ, за исключением исходной полимерной матрицы. Установлено, что по приработанной поверхности образцов наиболее износостойкими являются ПКМ с УВИС-АК-П. Скорость массового изнашивания этих ПКМ меньше в 2,3–2,5 раза по сравнению с аналогичным показателем для ПКМ с содержанием УНВ-02. Повышение коэффициента трения ПКМ при низкотемпературных испытаниях связано с постепенным «замораживанием» их структуры, которое приводит к снижению деформации поверхностного слоя ПКМ и расширению областей упругих и упругоэластических деформаций при фрикционном взаимодействии с металлическим контртелом. Кроме этого, в процессе трения, включая приработку, в результате обнажения поверхности ПКМ твердые частицы УВ начинают выступать на поверхности трения (рис. 2, в, г), вследствие чего повышается шероховатость поверхностного слоя, что также приводит к повышению коэффи-

циента трения. Но, с другой стороны, выступающие на поверхности частицы УВ локализуют сдвиговые деформации и воспринимают часть нагрузки на себя, что в комплексе с «замораживанием» структуры ПКМ в процессе трения при низкой температуре приводит к повышению твердости ПКМ, обеспечивая более сильное повышение износостойкости по сравнению с трением при комнатной температуре.

Структурными исследованиями показано, что введение в полимер микро- и нановолокнистых углеродных наполнителей с развитой удельной поверхностью приводит к существенному изменению процессов кристаллизации с формированием различных надмолекулярных структурных элементов в ПТФЭ в виде различных сферолитных образований (рис. 2, а, б).

Как видно из рис. 2, а, б, характер разрушения ПКМ при получении хрупких сколов в зависимости от размеров использованных УВ различается. На поверхности хрупкого скола ПКМ с УВИС-АК-П отчетливо наблюдаются частицы волокон, при этом полимер частично обволакивает волокна и адсорбируется на их поверхности. Происходит формирование структуры с центрами кристаллизации на фрагментах поверхности частиц УВ за счет интенсификации адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз полимер–наполнитель при использовании технологии № 2. В этом случае при получении хрупкого скола разрушение ПКМ происходит путем расслаивания по границе раздела фаз полимер–наполнитель, т. е. наблюдается адгезионное разрушение [28]. Тогда как на хрупких сколах композитов с УНВ частицы наполнителя не обнаружены. Это, ви-

димо, связано с тем, что УНВ представляют собой совокупность углеродных нитей, спутанных между собой, с большой удельной поверхностью, что приводит к формированию более прочной связи на границе раздела фаз полимер–частицы УНВ по сравнению с композитами с УВИС-АК-П. Сильное межфазное взаимодействие компонентов полимерной системы часто приводит к снижению значений прочности и относительного удлинения при разрыве ПКМ, что связано с частичной утратой сегментальной подвижности макромолекулярных цепей полимера вследствие их сорбции на поверхности наполнителя [29].

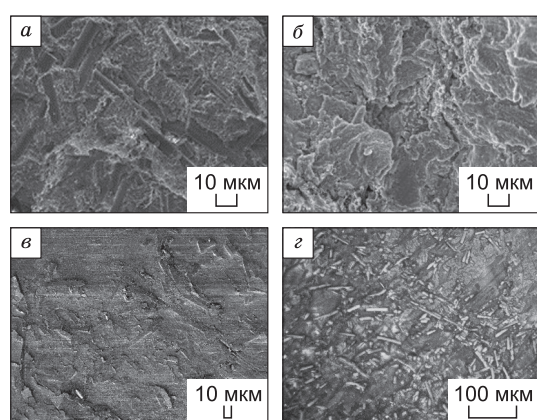


Рис. 2. Надмолекулярная структура ПКМ: а – ПТФЭ+5 мас.% УВИС-АК-П; б – ПТФЭ+5 мас.% УНВ-02; Поверхности ПКМ после трения: в – ПТФЭ+5 мас.% УВИС-АК-П; г – ПТФЭ+5 мас.% УНВ-02

Fig. 2. Supramolecular structure of PCM: а) PTFE+5 wt.% UVIS-AK-P; б) PTFE+5 wt.% UNV-02; PCM surfaces after friction: в) PTFE+5 wt.% UVIS-AK-P; г) PTFE+5 wt.% UNV-02

С этим и связаны, возможно, сниженные значения деформационно-прочностных показателей ПКМ с УНВ по сравнению с аналогичными показателями ПКМ с УВИС-АК-П даже при использовании технологии № 2 (см. табл. 1). В этом случае за счет сильного упрочнения связи полимер–наполнитель наблюдается когезионный характер разрушения по полимерной матрице (см. рис. 2, б). Такая же картина наблюдается в работе авторов [30] при использовании УНВ в качестве модификаторов полиэтилена.

Для определения температуры в зоне скользящего контакта ПКМ–стальное контртело использовали термопару ТХА тип К и тепловизор NEC Thermo tracer TH7102, фиксирующий температуру во внешних точках. Для этого термопару устанавливали в образец до глубины 5 мм в предповерхностном слое на расстоянии 1 мм и в поверхностных слоях на расстоянии 2,5 и 4 мм от зоны фрикционного контакта. Данные представлены на рис. 3.

Точное измерение температуры в зоне фрикционного контакта сопряжено с рядом трудностей, и в большинстве случаев при использовании прямых методов их измерения используются методы искусственной, естественной и скользящей термопары, при которых они вводятся в объем одного из трущихся тел.

На рис. 4 представлены графики изменений температуры в поверхностном слое ПКМ в процессе трения на расстоянии от поверхности трения 1 мм, 2,5 и 4 мм в зависимости от температуры в камере.

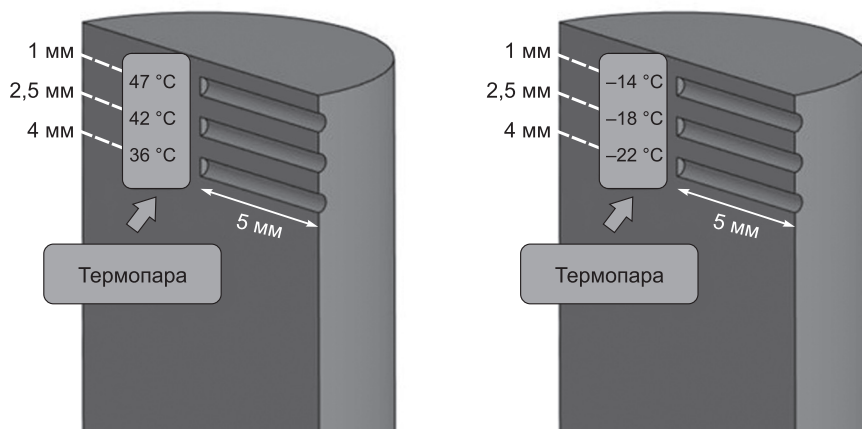


Рис. 3. Температурные показания термопары в процессе трения на образце: а – при комнатной температуре; б – при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Thermocouple temperature readings during friction testing of the sample: (а) at room temperature; (б) at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

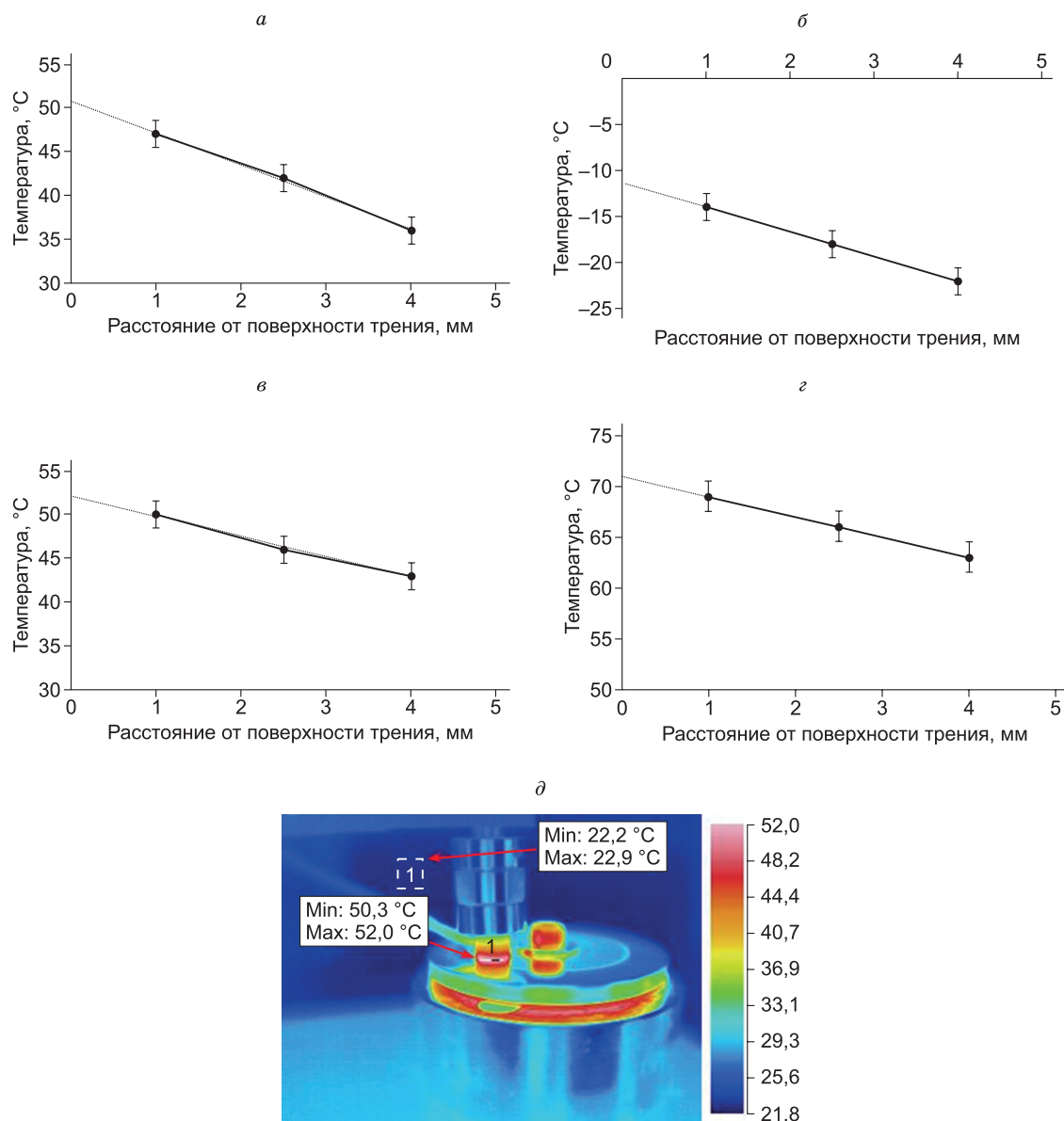


Рис. 4. Зависимость температуры в зоне контакта от расстояния от поверхности трения: а – при комнатной температуре; б – при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; в – при $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$; з – при $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$; д – тепловизионный снимок в процессе трения ПКМ при комнатной температуре

Fig. 4. Dependence of temperature in the contact zone on the distance from the friction surface: а) at room temperature; б) at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; в) at $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$; з) at $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$; д) thermal image during friction of PCM at room temperature

Видно, что зависимость температур в образцах от расстояния нахождения термопары имеет линейный характер и путем аппроксимации по линейной модели можно теоретически определить температуру на поверхности контакта сопрягаемых деталей в металлополимерной трибосистеме. Так, выявлено, что при температуре в камере $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ трибосистема переходит на стационарный режим трения через 10 мин с установлением температуры в зоне контакта $-11,3\text{ }^{\circ}\text{C}$,

а при комнатной температуре трибосистема переходит на стабильный показатель температуры только через 35 мин с выходом на температуру $+51,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме этого, для прогнозирования температуры в зоне контакта в различных условиях окружающей среды проведены триботехнические испытания ПКМ в камере при $+40$ и $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом выявлено, что при $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура на поверхности контакта ПКМ–стальное контроле может повыситься до $+52,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ –

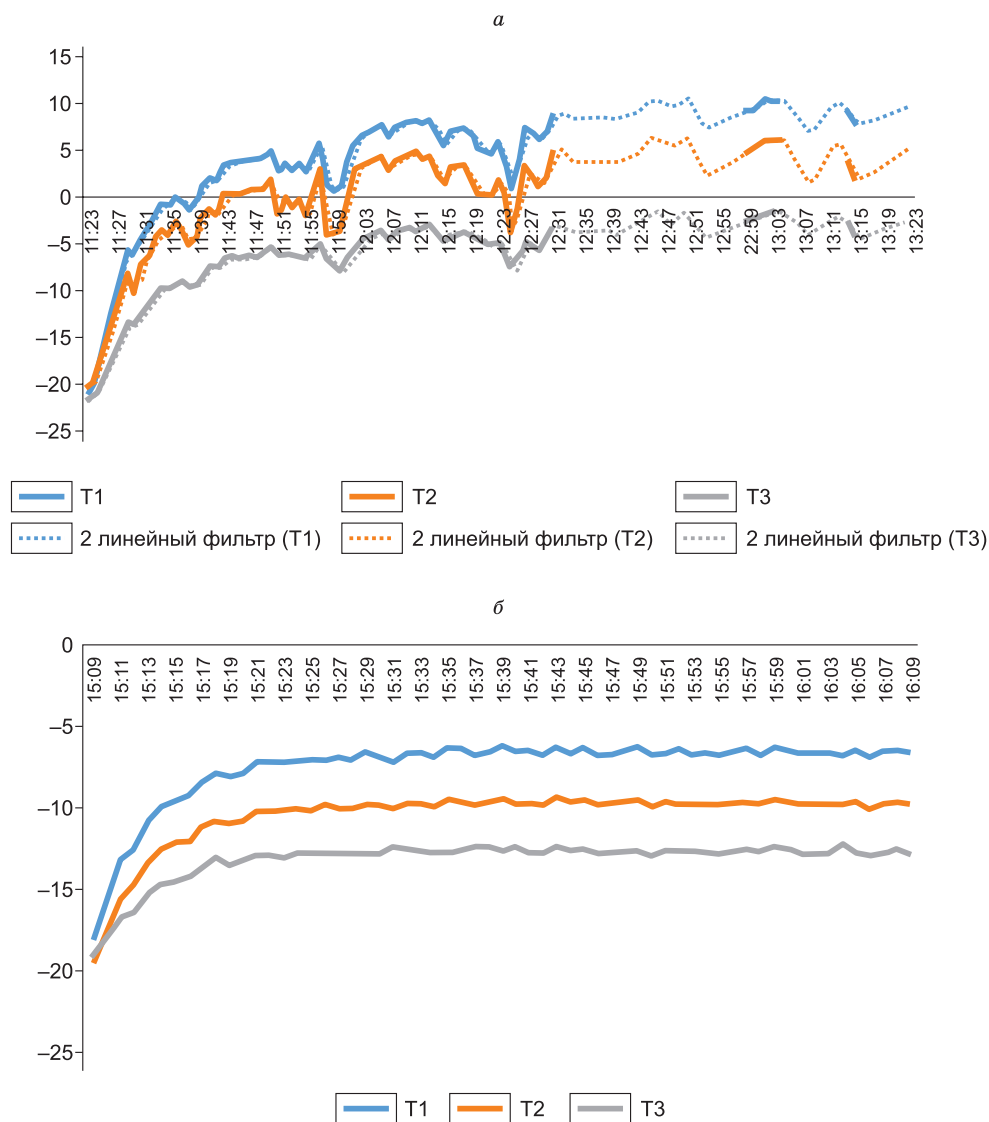


Рис. 5. Графики изменения температуры в зоне контакта при испытаниях: *а* – на открытом воздухе при температуре $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорости ветра 2 м/с ; *б* – в камере тепла-холода при температуре $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Т1 – температура в поверхностном слое на расстоянии 1 мм ; Т2 – на расстоянии $2,5\text{ мм}$; Т3 – на расстоянии 4 мм

Fig. 5. Graphs of temperature variation in the contact zone during testing: *a*) in open air at $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$, with a wind speed of 2 м/с ; *b*) in a thermal chamber at $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Т1 – temperature in the surface layer at a distance of 1 мм ; Т2 – at 2.5 мм ; Т3 – at 4 мм

до $+71\text{ }^{\circ}\text{C}$. Полученные результаты измерения температуры в зоне трения ПКМ–стальное контртело при комнатной температуре в помещении хорошо согласуются с данными, полученными тепловизором (см. рис. 4, д).

На рис. 5 показаны графики изменения температуры в поверхностных слоях в зоне контакта трения образца композита с $5\text{ мас.}\%$ УНВ-02 на расстоянии $1, 2,5, 4\text{ мм}$ при триботехнических испытаниях на открытом воздухе при температуре $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ (скорость ветра 2 м/с) и в камере тепла-холода при этой же температуре. Показа-

но, что на открытом воздухе под воздействием окружающей среды (ветра, солнца) температуры в поверхностных слоях образца колеблются и, в какой-то мере, на стабильные значения переходят только через $1,5\text{--}2\text{ ч}$. По истечении 2 ч трения температура в поверхностном слое полимерного образца на расстоянии 1 мм от зоны фрикционного контакта установилась $+9,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2,5\text{ мм}$ $+5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 мм $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 5, а). Скорость массового изнашивания ПКМ составила $0,1\text{ мг/ч}$, коэффициент трения $0,24$. Иной характер изменения температуры в процессе трения

показан на рис. 5, б при испытаниях в камере тепла-холода при такой же температуре. Установлено, что температуры в поверхностных слоях ПКМ стабилизируются через 20 минут на отметках $-6,5$, $-9,7$, $-12,8$ °C в зависимости от расстояний нахождения термопар, т. е. не достигают плюсовых значений. Это, скорее всего, связано с работой холодильной установки с постоянной обдувкой воздуха.

Заключение

На основании проведенных исследований установлено, что процесс трения ПКМ при отрицательной температуре в камере переходит на стационарный режим быстрее по сравнению с процессом трения в помещении при комнатной температуре и на открытом воздухе. При заданных параметрах трения, соответствующих нагрузке 160 Н, скорости скольжения 0,2 м/с и температуры в камере -30 °C, температура в зоне контакта ПКМ–стальное контртело повышается только до $-11,3$ °C, т. е. положительные температуры не достигаются. Путем измерений температуры в предповерхностном и поверхностном слоях ПКМ на основе ПТФЭ в процессе трения на различном расстоянии от зоны фрикционного контакта металлополимерной трибосистемы определены приближенные данные о температуре непосредственно в зоне трения в зависимости от температуры проведения эксперимента. Проведением триботехнических испытаний в камере при отрицательной температуре показано, что наиболее износостойкими являются ПКМ с содержанием микроволокон УВИС-АК-П. Для более детального исследования механизмов изнашивания ПКМ в зависимости от размерности УВ необходимо продолжить триботехнические испытания ПКМ при отрицательных и положительных температурах окружающего воздуха.

Список литературы / References

1. Бузник В.М., Бурковская Н.П., Зибарева И.В. и др. *Арктическое материаловедение: состояние и развитие*. М.: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина; 2021. 414 с. EDN: NANXPE
2. Buznik V.M., Burkovskaya N.P., Zibareva I.V., et al. *Arctic Materials Science: Status and Development*. Moscow: Gubkin University; 2021. 414 p. (In Russ.) EDN: NANXPE
3. Лепов В.В., Охлопкова А.А. Разработки в области северного и арктического материаловедения для промышленности Республики Саха (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(4):627–640. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-627-640> EDN: UEIHFX
4. Lepov V.V., Okhlopova A.A. Materials Science of the North and the Arctic for the industry of the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(4):627–640. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-627-640> EDN: UEIHFX
5. Лебедев М.П., Голиков Н.И., Сараев Ю.Н. и др. Климатические испытания материалов, элементов конструкций и изделий в условиях экстремально холодного климата Якутии. В кн.: *EURASTRENCOLD-2023. Сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященного 85-летию со дня рождения академика В.П. Ларионова, г. Якутск, 11–15 сентября 2023 г.* Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании; 2023. С. 329–334. EDN: OUOGPR
6. Lebedev M.P., Golikov N.I., Saraev Yu.N., et al. Climatic tests of materials, structural elements and products in the extremely cold climate of Yakutia. In: *EURASTRENCOLD-2023: Proceedings of the 11th Eurasian symposium on strength and resource problems in climatically low temperatures, dedicated to the 85th anniversary of the birth of Academician V.P. Lariionov, Yakutsk, September 11–15, 2023*. Kirov: Interregional Center for Innovative Technologies in Education; 2023, pp. 329–334. (In Russ.) EDN: OUOGPR
7. Александрова Д.С., Злобина И.В., Егоров А.С., Анисимов А.В. Влияние неблагоприятных климатических факторов, характерных для арктической зоны, на свойства полимерных материалов и композитов (обзор). *Вопросы материаловедения*. 2023;4(116):144–168. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2023-116-4-144-168> EDN: TYCZAA
8. Aleksandrova D.S., Zlobina I.V., Egorov A.S., Anisimov A.V. Influence of unfavorable climatic factors characteristic of the Arctic zone on the properties of polymeric materials and composites: a review. *Voprosy Materialovedeniya*. 2023;4(116):144–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2023-116-4-144-168> EDN: TYCZAA
9. Фторопластовые композиции с бронзой [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ftoroplast.com.ru/bronze-filled-ptfe-compounds/> (дата обращения: 09.04.2025).
10. PTFE compounds with bronze [Online]. Available at: <https://ftoroplast.com.ru/bronze-filled-ptfe-compounds/> (accessed: 09.04.2025).
11. Deshwal D., Belgamwar S.U., Bekinal S.I., Doddamani M. Role of reinforcement on the tribological properties of polytetrafluoroethylene composites: A comprehensive review. *Polymer Composites*. 2024;45(16):14475–14497. <https://doi.org/10.1002/pc.28802> EDN: RLHRJV
12. Yang D., Niu Q., Wang H., et al. Enhancement of friction and wear performance of polytetrafluoroethylene composites through the synergistic effect of hard fillers. *Polymer Composites*. 2025;46(5):4112–4128. <https://doi.org/10.1002/pc.29227> EDN: XVERUZ
13. Wang H., Zhu K., Tang Z., et al. Investigation of tribological behavior of polytetrafluoroethylene/graphene composite. *Polymer Composites*. 2024;45(16):15293–15306. <https://doi.org/10.1002/pc.28838> EDN: QYRQKN
14. Аюрова О.Ж., Корнопольцев В.Н., Ковтунец Е.В. и др. Самоармированные полимерные композиты на основе политетрафторэтилена. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2025;15(1):128–136. <https://doi.org/10.21285/achb.960> EDN: PTTHNY
15. Ayurova O.Zh., Kornopol'tsev V.N., Kovtunets E.V., et al. Self-reinforced polymer composites based on polytetrafluoro-

ethylene. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(1):128–136. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/achb.960> EDN: PTTHNY

10. Машков Ю.К., Байбарацкая М.Ю., Кургузова О.А. Влияние условий эксплуатации на износостойкость нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена. *Наука и военная безопасность*. 2021;25(2):78–83. EDN: VSKEYS

Mashkov Yu.K., Baibaratskaya M.Yu., Kurguzova O.A. Influence of operating conditions on the wear resistance of polytetrafluoroethylene-based nanocomposites. *Nauka i Voennaya Bezopasnost*. 2021;25(2):78–83. (In Russ.) EDN: VSKEYS

11. Аммосова А.П., Ушканов А.А., Слепцова С.А. и др. Исследование влияния природного шунгита на структуру и свойства политетрафторэтилена. *Вопросы материаловедения*. 2022;111(3):59–66. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-111-3-59-66> EDN: AHTVXI

Ammosova A.P., Ushkanov A.A., Sleptsova S.A., et al. The influence of natural shungite on the properties and structure of polytetrafluoroethylene. *Voprosy Materialovedeniya*. 2022;111(3):59–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2022-111-3-59-66> EDN: AHTVXI

12. Ушканов А.А., Слепцова С.А., Охлопкова А.А. и др. Влияние базальтового волокна на свойства и структуру композитов на основе политетрафторэтилена. *Композиты и наноструктуры*. 2022;14(2):117–129. <https://doi.org/10.36236/1999-7590-2022-14-2-117-129> EDN: GLFWFD

Ushkanov A.A., Sleptsova S.A., Okhlopova A.A., et al. Effect of basalt fiber on properties and structure of polytetrafluoroethylene-based composites. *Composites and Nanostructures*. 2022;14(2):117–129. (In Russ.) <https://doi.org/10.36236/1999-7590-2022-14-2-117-129> EDN: GLFWFD

13. Баронин Г.С., Бузник В.М., Мищенко С.В., Завражин Д.О. Исследование строения и свойств полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и наночастиц кобальта, титана и кремния. *Инженерно-физический журнал*. 2021;94(6):1655–1662. EDN: COKKLE

Baronin G.S., Mishchenko S.V., Zavrzhin D.O., Buznik V.M. Structure and properties of polymer composites based on polytetrafluoroethylene and cobalt, titanium, and silicon nanoparticles. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021;94(6):1619–1627. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02443-1> EDN: BIWPUI

14. Данилова С.Н., Тарасова П.Н., Ярусова С.Б. и др. Оценка влияния волластонита из техногенного отхода на свойства полимерного композита на основе политетрафторэтилена. *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2024;67(12):102–112. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20246712.7064> EDN: XDQZHR

Danilova S.N., Tarasova P.N., Yarusova S.B., et al. Evaluation of the influence of wollastonite from technogenic waste on the properties of a polymer composite based on polytetrafluoroethylene. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seryia Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2024;67(12):102–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20246712.7064> EDN: XDQZHR

15. Васильев А.П., Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Алексеев А.Г. Влияние модифицированного серицита на свойства и структуру политетрафторэтилена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;25(2):147–156. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-12> EDN: YLAVKN

Vasiliev A.P., Okhlopova A.A., Struchkova T.S., Alekseev A.G. Influence of modified sericite on the properties and structure of polytetrafluoroethylene. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(2):147–156. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-12> EDN: YLAVKN

16. Miao Y., Chen Q., Li Y., et al. Tribological properties of carbon nanotube/polymer composites: A mini-review. *Frontiers in Materials*. 2023;10:1129676. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1129676> EDN: WWQPDY

17. Lancaster J.K. Geometrical effects on wear of polymers and carbons. *Journal of Lubrication Technology*. 1997;2:187–194.

18. Свириденко А.И., Савкин В.Г. Структурная трибомеханика материалов на основе полимеров. *Трение и износ*. 1980;8(1):150–167.

Sviridenok A.I., Savkin V.G. Structural tribomechanics of polymer-based materials. *Friction and Wear*. 1980;8(1):150–167. (In Russ.)

19. Соломко В.П. О структурной, кинетической и термодинамической активности наполнителей. *Химическая технология*. 1973;6(72):7–10.

Solomko V.P. On the structural, kinetic and thermodynamic activity of fillers. *Chemical technology*. 1973;6(72):7–10. (In Russ.)

20. Маркова М.А., Петрова П.Н., Федоров А.Л., Попов С.Н. Разработка высокопрочных полимерных материалов на основе политетрафторэтилена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;25(2):157–165. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-13> EDN: FCKLOF

Markova M.A., Petrova P.N., Fedorov A.L., Popov S.N. Development of high-strength polymer materials based on polytetrafluoroethylene. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(2):157–165. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-13> EDN: FCKLOF

21. Afonnikova S.D., Veselov G.B., Bauman Yu.I., et al. Synthesis of Ni-Cu-CNF composite materials via carbon erosion of Ni-Cu bulk alloys prepared by mechanochemical alloying. *Journal of Composites Science*. 2023;7(6):238. <https://doi.org/110.3390/jcs7060238> EDN: SMHXIY

22. Kim Y., Kim M.S., Jeon H.J., et al. Mechanical performance of polymer materials for low-temperature applications. *Applied Sciences*. 2022;23(12):12251. <https://doi.org/10.3390/app122312251> EDN: HCCAUV

23. Zare Y., Rhee K.Y. Analysis of the connecting effectiveness of the interphase zone on the tensile properties of carbon nanotubes (CNT) reinforced nanocomposite. *Polymers*. 2020;12(4):896. <https://doi.org/10.3390/polym12040896> EDN: AHCNCX

24. Duan K., Li L., Wang F., et al. New insights into interface interactions of CNT-reinforced epoxy nanocomposites. *Composites Science and Technology*. 2021;204:108638. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108638>

25. Bahramnia H., Semnani H.M., Habibolahzadeh A., Abdoos H. Epoxy/polyurethane hybrid nanocomposite coatings reinforced with MWCNTs and SiO₂ nanoparticles: Processing, mechanical properties and wear behavior. *Surface and Coatings Technology*. 2021;415:127121. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127121> EDN: RKXRFJ

26. Shimizu T., Kishi R., Kobashi K., et al. Improved thermal stability of silicone rubber nanocomposites with low filler content, achieved by well-dispersed carbon nanotubes. *Composites Communications*. 2020;22:100482. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100482> EDN: UPUQZA

27. Yan Y.F., Meng Z.J., Xin X.C., et al. Tribological behavior and thermal stability of thermoplastic polyimide/poly (ether ether ketone) blends at elevated temperature. *Journal of Macromolecular Science Part B: Physics*. 2020;60:175–189. <https://doi.org/10.1080/00222348.2020.1841952>

28. Молоковских Н.В., Стабрёдов И.А. Адгезия полимерных композиционных материалов. *Тенденции разви-*

тия науки и образования. 2021;71(2):62–64. <https://doi.org/10.18411/lj-03-2021-52> EDN: TZQQLG

Molokovskikh N.V., Stabredov I.A. Adhesion of polymer composite materials. *Trends in the Development of Science and Education*. 2021;71(2):62–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.18411/lj-03-2021-52> EDN: TZQQLG

29. Липатов Ю.О. *Физико-химия наполненных полимеров*. Киев: Наукова думка; 1967. 234 с.

Lipatov Yu.O. *Physico-chemistry of filled polymers*. Kyiv: Naukova Dumka; 1967. 234 p. (In Russ.)

30. Petukhova E.S., Afonnikova S.D., Fedorov A.L., et al. The influence of structure of carbon nanofibers on their interaction with polyethylene matrix. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect*. 2024;699:134682. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134682> EDN: GLNGGA

Об авторах

ИСАКОВА Татьяна Александровна, инженер-исследователь, лаборатория материаловедения, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-3961-087X>, ResearcherID: A-9005-2019, Scopus Author ID: 56233152900, SPIN: 2897-2348, e-mail: tatyana_issakova@mail.ru

ПЕТРОВА Павлина Николаевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, и.о. зав. лаб. материаловедения, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, ResearcherID: A-6425-2014, Scopus Author ID: 13906602000, SPIN: 4704-0089, e-mail: ppavlina@yandex.ru

МАРКОВА Марфа Алексеевна, кандидат технических наук, научный сотрудник, лаборатория материаловедения, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3000-1560>, ResearcherID: F-3227-2017, Scopus Author ID: 57207729946, SPIN: 1249-7726, e-mail: markovamusya@mail.ru

ФЕДОРОВ Андрей Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория материаловедения, Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, ResearcherID: A-5442-2014, Scopus Author ID: 55845420304, SPIN: 6079-2229, e-mail: gelvirb@mail.ru

Вклад авторов

Исакова Т.А. – проведение исследования, верификация данных, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи; **Петрова П.Н.** – разработка концепции, методология, руководство исследованием, редактирование рукописи; **Маркова М.А.** – проведение исследования, верификация данных, проведение статистического анализа; **Федоров А.Л.** – верификация данных, ресурсное обеспечение исследования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ISAKOVA, Tatyana Aleksandrovna, Research Engineer, Laboratory of Materials Science, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3961-087X>, ResearcherID: A-9005-2019, Scopus Author ID: 56233152900, SPIN: 2897-2348, e-mail: tatyana_issakova@mail.ru

PETROVA, Pavlina Nikolaevna, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Acting Head of the Materials Science Laboratory, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, ResearcherID: A-6425-2014, Scopus Author ID: 13906602000, SPIN: 4704-0089, e-mail: ppavlina@yandex.ru

MARKOVA, Marfa Alekseevna, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Laboratory of Materials Science, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3000-1560>, ResearcherID: F-3227-2017, Scopus Author ID: 57207729946, SPIN: 1249-7726, e-mail: markovamusya@mail.ru

FEDOROV, Andrey Leonidovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Materials Science, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, ResearcherID: A-5442-2014, Scopus Author ID: 55845420304, SPIN: 6079-2229, e-mail: gelvirb@mail.ru

Authors' contribution

Isakova T.A. – investigation, data validation, statistical analysis, writing – original draft; **Petrova P.N.** – conceptualization, methodology, supervision, writing – review & editing; **Markova M.A.** – investigation, data validation, statistical analysis; **Fedorov A.L.** – data validation, resources

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 24.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.10.2025

Принята к публикации / Accepted 19.11.2025