

## Полиариленэфиркетоны: синтез, свойства, применение (обзор) Polyarylene ether ketones: synthesis, properties, application (review)

*А.М. ХАРАЕВ, Р.Ч. БАЖЕВА, Д.А. АЛАКАЕВА*

*A.M. KHARAEV, R.CH. BAZHEVA, D.A. ALAKAEVA*

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия  
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekova, Nalchik, Russia  
am\_charaev@mail.ru

В данной статье представлен обзор литературных данных по синтезу, свойствам и применению полиариленэфиркетонов за последние 10 лет.

**Ключевые слова:** полиариленэфиркетон, полиэфирэфиркетон, полиэфиркетонкетон, полиэфиркетон, реакция электрофильного замещения, реакция нуклеофильного замещения

This article presents a review of the literature data on the synthesis, properties and application of polyarylene ether ketones over the past 10 years.

**Keywords:** polyarylene ether ketone, polyether ether ketone, polyether ketone ketone, polyether ketone, electrophilic substitution reaction, nucleophilic substitution reaction

DOI: 10.35164/0554-2901-2024-06-23-29

Полиариленэфиркетоны (ПАЭК) представляют собой биосовместимые полициклические ароматические термопластичные полимеры, обладающие высокими механическими и термическими свойствами. Полиариленэфиркетоны – это семейство полимеров с различным соотношением простых эфирных и кето-групп. Известно, что все ароматические полиэфиркетоны делятся на две группы: полукристаллические и аморфные. На сегодняшний день известно о более чем 340 различных марках ПАЭК, и большинство из них аморфны. Хотя аморфные ПАЭК на сегодняшний день не нашли широкого применения, растворимость большинства представителей этой группы открывает, наряду с комплексом высоких эксплуатационных характеристик, перспективы для применения данных ПАЭК в совершенно новых областях.

В литературе имеется большое количество информации, в том числе обзорного характера, по способам получения, свойствам и применению ПАЭК [1–10].

Наиболее значимыми представителями данного класса являются: полиэфиркетон (ПЭК), полиэфирэфиркетон (ПЭЭК), полиэфирэфиркетонкетон (ПЭЭКК), полиэфиркетонкетон (ПЭКК), полиэфирэфиркетонэфиркетон (ПЭЭКЭК), полиэфирэфирэфиркетон (ПЭЭЭК) и др. Разница в соотношении простой эфирной и кетонной групп влияет на многие характеристики ПАЭК, в частности, на температуру плавления и температуру стеклования.

Полиариленэфиркетоны различного состава и строения нашли широкое применение во многих отраслях техники из-за уникального сочетания различных эксплуатационных характеристик. Эти полимеры обладают хорошей термоокислительной стабильностью, устойчивостью к химическим реагентам и повышенной ударной вязкостью, в свете чего рассматриваются как перспективные конструкционные материалы. Они могут использоваться в чистом виде, а также в смесях с другими промышленными полимерами, такими как полиэфиримиды, полиимиды, полиарилаты. В этом случае образуются многофазные системы с хорошей адгезией на границе раздела, с высокими физико-механическими показателями.

Классическими способами получения ПАЭК являются реакции нуклеофильного замещения, которые состоят в поликонденсации алколюлятов диоксисоединений с ароматическими соединениями, содержащими подвижный атом галогена, активированный карбонильными группами, а также реакции электрофильного замещения по Фриделю–Крафтсу с использованием кислот Льюиса в качестве катализатора [1–3, 8, 11–13].

Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) является одним из важных представителей семейства полиариленэфиркетонов со многими превосходными характеристиками. Элементарные звенья ПЭЭК содержат две простые эфирные и одну кетонную группы. ПЭЭК был впервые произведен компанией Imperial Chemicals Industries в 1978 году и с тех пор привлек большое внимание в различных отраслях промышленности. Благодаря своей линейной ароматической структуре, этот высокоэффективный термопластичный полимер демонстрирует превосходную термическую стойкость, механические характеристики, низкий коэффициент линейного расширения и химическую стабильность (растворим только в серной кислоте при 60°C). Основным недостатком ПЭЭК является их высокая стоимость и трудность переработки традиционными для полимеров методами.

По упрощенной технологии, реакцией нуклеофильной поликонденсации получен высокомолекулярный мелкодисперсный ПЭЭК. При взаимодействии эквимольных количеств гидрохинона и дигалогенбензофенонов в среде дифенилсульфона в присутствии щелочного агента при поэтапном повышении температуры до  $320 \pm 5^\circ\text{C}$  [14].

По нуклеофильному методу можно получить ПЭЭК взаимодействием 4,4'-дифторбензофенона с 1,4-бис(триметилсилоксан)бененом в присутствии катализатора – фторида цезия при  $220\text{--}320^\circ\text{C}$  [13].

Разработан метод синтеза гомополимера ПЭЭК с направленным регулированием молекулярной массы (ММ) с помощью варьирования избытка одного из мономеров. Изучены основные физико-механические свойства полученных ПЭЭК с различной ММ. Результаты исследования синтезированных ПЭЭК методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) показывают, что с увеличением избытка ДФБФ и, как следствие, со снижением молекулярной массы полимеров, закономерно снижается температура стеклования [15].

Интерес к ПЭЭК в Российской Федерации в последние годы неуклонно растет. Специалистами Акционерного общества «Институт пластмасс имени Г.С. Петрова» (АО «Институт пластмасс») разработана технология и в 2017 г. организовано опытно-промышленное производство ПЭЭК, который имеет температуру длительной эксплуатации до  $260^\circ\text{C}$  (кратковременно до  $310^\circ\text{C}$ ), обладает высокой деформационной теплостойкостью и устойчивостью к гидролизу (в том числе в среде горячего водяного пара),

к кислотам, щелочам, алифатическим и ароматическим углеводородам; характеризуется особым поведением при горении; стоек к радиационному излучению. Способ получения ПЭЭК защищен патентом [16].

Проведены сравнительные исследования теплофизических характеристик ПЭЭК производства АО «Институт пластмасс» и зарубежного марки Victrex 150G. По результатам исследований ПЭЭК отечественного производства соответствуют показателям импортного аналога, т.к. температуры стеклования, кристаллизации и плавления отечественного и импортного образцов различаются не более чем на 1°C, а тепловые эффекты плавления и кристаллизации также имеют близкие значения. Термогравиметрический анализ показал высокую термостойкость ПЭЭК (551°C и 552°C АО «Институт пластмасс» и Victrex 150G, соответственно). Для переработки ПЭЭК, которая осуществляется при температуре 370–390°C, продолжительность нахождения материала под воздействием таких высоких температур может исчисляться десятками минут. Важно отметить, что вязкость расплава ПЭЭК зависит от температуры и снижается при увеличении скорости сдвига. Для всех партий ПЭЭК характерно неньютоновское течение расплава, при этом характер течения одинаковый для всех исследованных материалов [17].

Получена термостойкая полимерная композиция на основе смеси двух ПАЭК, которая включает основной кристаллический полиэфирэфиркетон – продукт взаимодействия гидрохинона и дифторбензофенона, и аморфный полиэфиркетон, в качестве которого используют продукт взаимодействия дифторбензофенона и 4,4'-оксибензилгексафторпропана. Полученная в результате полимерная композиция обладает такими характеристиками, как улучшенное относительное удлинение при растяжении, сохранение температуры плавления на уровне кристаллического полиэфирэфиркетона и однородность свойств по всему объему изделий [18].

Реакцией высокотемпературной поликонденсации получен полиариленэфиркетон [19]. Вначале проводят реакцию 3,3',5,5'-тетрабромфенолфталеина и 4,4'-дифторбензофенона в среде N,N-диметилацетамида в присутствии карбоната калия и наноуглерода марки GNC. Капсулирование проводят непрерывным способом путем обработки раствора полиариленэфиркетона в хлорированном органическом растворителе водным раствором желатина, пектина яблочного или смеси желатина и пектина яблочного. Данный метод позволяет получить ПАЭК, обладающий высокими значениями кислородного индекса, механических, термических свойств, а также низким водопоглощением.

Описан способ капсулирования ароматических полиэфирэфиркетонов и сополиэфирэфиркетонов, полученных в результате синтеза смеси различных бисфенолов. В результате получены капсулированные ароматические полиэфирэфир- и сополиэфирэфиркетоны, которые обладают такими свойствами, как сыпучесть, отсутствие липкости, отсутствие пыли, высокая насыпная плотность, а также технологичность при переработке методами литья и экструзии [20].

Для совершенствования способов синтеза и регулирования свойств полиариленэфиркетонов на примере двухстадийного синтеза акцепторно-каталитической поликонденсацией получено большое количество аморфных ПАЭК [21, 22]. На первой стадии получали олигокетоны на основе бисфенола А, фенолфталеина, 1,1-дихлор-2,2-ди(п-оксифенил)этилена, 1,1-дихлор-2,2-ди(3,5-дибром-п-оксифенил)этилена и других диоксисоединений различной степени конденсации с концевыми гидроксильными группами. На второй стадии проводили конденсацию полученных олигокетонов с дихлорангидридами различных кислот, в том числе и кислоты с дихлорэтиленовой группой, взятых в эквимолярных соотношениях. Синтез ПАЭК проводили при комнатных условиях в среде 1,2-дихлорэтана. В качестве акцептора-катализатора использовали двойной избыток триэтиламина по отношению к олигокетонам. Полученные полиэфиркетоны блочного строения хорошо растворимы во многих низкокипящих органических растворителях, обладают высокой термоокислительной стойкостью и огнестойкостью. Показано, что ПАЭК, содержащие двойные связи, способны к термоотверждению [23–26].

Известен способ [27] получения полиэфирэфиркетона на основе дифторбензофенона и гидрохинона высокотемпературной поликонденсацией в присутствии органоглины. После растворения основных компонентов температуру реакционной массы повышают, а затем вводят смесь из  $K_2CO_3$ ,  $Na_2CO_3$  и органоглины. Полученный при сниженных температурных и временных режимах синтеза полиэфиркетон обладает улучшенными свойствами. Установлено, что введение незначительного количества органоглины приводит к изменению надмолекулярной структуры материала и при этом приводит к сокращению времени синтеза материала и понижению температурных режимов синтеза.

Заявлен способ получения полиариленэфиркетонов, предназначенных для использования в качестве суперконструкционных полимерных материалов. Способ получения заключается в том, что проводят реакцию дигалогенпроизводного и гидроксисоединений, сомономера фенолового красного и карбоната калия в присутствии растворителя при температуре реакции 160°C в течение 5 часов. В качестве растворителя используют диметилацетамид. Изобретение позволяет получить полиариленэфиркетоны одностадийным способом [28].

Разработан метод получения сополиариленэфиркетонов на основе 4,4'-диоксидифенилпропана и гидрохинона с 4,4'-дифторбензофеноном с различными соотношениями диоксисоединений. Синтез проводят высокотемпературной поликонденсацией по реакции нуклеофильного замещения при ступенчатом подъеме температуры до 320°C в течение 2 часов и выдержкой при этой температуре еще в течение 2–4 часов. В качестве органического растворителя используется дифенилсульфон, щелочного агента –  $K_2CO_3$  [29].

Новые подходы к синтезу ПАЭК основаны на использовании в синтезе гидрохинона с боковыми объемными заместителями, которые удаляются после поликонденсации на отдельной стадии. Наличие этих заместителей позволяет получать аморфные ПАЭК, растворимые в таких растворителях, как диметилсульфоксид, N-метилпирролидон, сульфолан при температуре синтеза не ниже 170°C. Синтез ПАЭК реакцией поликонденсации проводят также и в расплаве. Таким способом получают ПАЭК при температурах 220–280°C из триметилсилоксановых эфиров различных бисфенолов и 4,4'-дифтордифенилкетона, используя в качестве катализатора фторид цезия [13].

Новый подход к синтезу ПЭК как термостабильного полимера основан на получении ПЭК через промежуточный комплекс 1,3-бис(4-феноксibenзоил)бензола с кислотой Льюиса. Полученный комплекс 1,3-бис(4-феноксibenзоил)бензол – кислота Льюиса используют без дополнительной стадии предварительной очистки и выделения [30]. Данный способ позволяет обеспечить гомогенность реакционной системы и высокую скорость реакции, приводящие к получению полимера с требуемой вязкостью расплава. ПЭК обладают лучшей перерабатываемостью и содержат низкое количество ксантогидрольных групп. Высокая растворимость 1,3-бис(4-феноксibenзоил)бензола в растворителе позволяет с максимальной степенью удалять его остаточные количества из конечного полимера и получать ПЭК с высокой степенью чистоты [30].

Предложен способ получения ПЭК реакцией электрофильного замещения низкотемпературной поликонденсацией в 1,2-дихлорэтано в две стадии. Первая стадия проводится при высоких концентрациях мономеров (0,3–0,7 моль/л) и пониженной температуре (от минус 15 до 0°C) и разбавлении реакционной массы на второй стадии от 0,05 до 0,2 моль/л путем добавления 1,2-дихлорэтана. Максимальная температура реакционной смеси на второй стадии составляет 45°C, общая продолжительность процесса синтеза не превышает 100 минут. Проведение синтеза на первой стадии позволяет увеличить скорость реакции и уменьшить продолжительность процесса, а разбавление реакционного раствора дихлорэтаном на второй стадии позволяет избежать агломерации выпадающих частиц ПЭК [31].

Запатентован процесс производства волокна из ПЭК, который состоит из стадии смешения ПЭК и серной кислоты, имеющей концентрацию по меньшей мере 98 масс.%, чтобы получить прядильный «сироп», и пропускания этого прядильного «сиропа»

через фильеру в коагуляционную ванну. Состав коагуляционной ванны может варьироваться.

Заявленный способ позволяет снизить линейную плотность непрерывных элементарных волокон и уменьшить их диаметр [32].

Одностадийным методом синтезирован ряд сополимеров ПЭКК с различным соотношением терефталатных и изофталатных групп. Подробно изучены процессы кристаллизации и плавления синтезированных сополимеров. С увеличением содержания изофталатных звеньев в сополимерах температура плавления постепенно снижается, а температура стеклования изменяется незначительно. Скорость кристаллизации увеличивается с уменьшением содержания изофталатных групп [33].

Для модификации поверхности раздела композитов из ПЭКК, армированных углеродным волокном, с целью одновременного улучшения характеристик экранирования от электромагнитных полей и механических характеристик, использован МХене ( $Ti_3C_2Tx$ ) [34].

Перспективным направлением применения ПЭКК является изготовление наночистотных мембран из полых волокон растворным методом электропрядения [35, 36]. ПЭКК, используемый в качестве высокоэффективного наполнителя углеродных нанотрубок, может усиливать межфазную адгезию между полимерной матрицей и волокном [37]. Добавление небольшого количества углеродной нанотрубки позволяет значительно улучшить свойства материала [38–42].

Получены ленты препрега из ПЭКК, армированные непрерывным углеродным волокном, с добавлением углеродных нанотрубок (УНТ). Исследованы их электропроводность, теплопроводность, свойства при растяжении, динамическое механическое поведение, морфология изломов и поведение при кристаллизации и плавлении. Результаты показывают, что электропроводность ( $\sigma$ ), теплопроводность ( $\lambda$ ), прочность при разрыве ( $\sigma_p$ ) и межфазная адгезия лент препрега явно улучшились при добавлении УНТ. Также было обнаружено, что с увеличением содержания УНТ появляется агломерация УНТ. Результаты ДСК показали, что УНТ играют роль гетерогенного зародышеобразователя в матрице ПЭКК, но оказывают меньшее влияние на поведение ПЭКК при плавлении. В целом, УНТ оказались эффективными при армировании композитов термопластик/углеродное волокно и могут быть использованы для изготовления высокоэффективных многофункциональных композитов [43].

Из препреговых лент УНТ/УВ/ПЭКК были получены ламинаты, в которых распределение полимерной матрицы и волокна более равномерное и с меньшей пористостью, чем в препрегах. Ламинаты получали прессованием при давлении 2 МПа и температуре 340°C в течение 15 минут, затем форму охлаждали до комнатной температуры и извлекали из нее ламинат [44].

Исследована кинетика кристаллизации ПЭКК с низким значением показателя текучести расплава. В качестве материала был выбран ПЭКК марки ПЭКК-5Г. Изучение процесса проводили методом ДСК в изотермическом режиме. В результате предварительных экспериментов был выбран диапазон температур 306–310°C [45].

Изучены вязкоупругие свойства пластиков на основе ПЭКК с целью их использования в протезах опорно-двигательной системы. Механические испытания ненаполненного ПЭКК и трех композитов на его основе с углеродным наполнителем в виде волокон различной длины показали высокие упруго-прочностные характеристики указанных материалов. Ненаполненный и армированный наночистотами ПЭКК обладают низкой ползучестью в диапазоне малых (до 1%) деформаций растяжения при напряжениях менее 20% от предела упругости. Аналогичную деформационную стабильность показали ПЭКК-композиты, содержащие до 30 масс.% углеродных волокон длиной 200 мкм – 2 мм, при более высоком (1–3%) уровне деформаций, соответствующих напряжениям, равным 40–60% от предела упругости. Показана возможность применения ПЭКК-композитов для изготовления головки эндопротеза [46].

Изучены физико-механические процессы, происходящие при переработке модифицированного и наполненного ПЭКК. Добавление к кристаллизующемуся ПЭКК аморфного Со-ПАЭК способ-

ствует улучшению прочностных характеристик полимерного материала. Полученные результаты свидетельствуют о значительном (в 2–3 раза) увеличении прочности при разрыве, ударной вязкости по Шарпи с надрезом и модуля упругости при растяжении композитов, а также увеличении температуры изгиба под нагрузкой при наполнении углеродным и стекловолокном. Это, возможно, связано с равномерным распределением волокон в материале, которые принимают на себя все прилагаемые нагрузки при отработанной технологии получения армированных композиций. Наибольший рост физико-механических свойств замечен при наполнении ПЭКК углеродным волокном. Даже повышая степень наполнения стекловолокном, не удастся достичь тех же показателей композита, как при использовании углеродного волокна в меньших количествах. Видимо, это обусловлено превосходством свойств углеродного над физико-механическими характеристиками стекловолокна [47].

Исследована возможность использования сверхкритического  $CO_2$  в качестве вспенивателя ПЭКК с различной кристаллическостью. Изучены массоперенос газов и теплофизическое поведение. Изменяя параметры процесса вспенивания, были приготовлены микроячеистые пены с различной морфологией ячеек. Также было подробно исследовано влияние кристаллизации на морфологию ячеек. Результаты показывают, что кристаллизация ограничивает диффузию газа в материал, а теплофизическое поведение насыщенного образца ПЭКК с низкой кристаллическостью представляет собой два процесса холодной кристаллизации. Распределение ячеек по размерам формируется при вспенивании образцов при температуре выше 320°C [48].

В работе [49] описана рецептура композиции на основе ПЭКК. Для повышения механических свойств композитов на основе ПЭКК используется армирование короткими углеродными волокнами (КУВ). Повышение триботехнических свойств в режиме сухого трения обеспечивается добавлением твердосмазочных частиц фторопласта (ПТФЭ), что позволяет снизить коэффициент трения и объемный износ. Исследованы физико-механические и триботехнические свойства полученных образцов. Вследствие возможного абразивного износа контртела при добавлении углеродных волокон, объемный износ полученных образцов определяли на двух контртелах (металлическом и керамическом) в режиме сухого трения скольжения по схеме «шар-по-диск». Экспериментальные данные представлены в виде зависимостей эффективных характеристик (коэффициента трения, объемного износа, модуля упругости, твердости по Шору, предела прочности и относительного удлинения при растяжении) от степеней наполнения композиции короткими углеродными волокнами и частицами фторопласта [49].

Определены показатели текучести расплава полиэфирэфиркетона марки ПЭКК-50П производства АО «Институт пластмасс». Значения показателя текучести при температурах 360, 380 и 400°C составили 69, 92 и 100 г/10 мин соответственно. Установлен оптимальный температурный интервал переработки расплава в диапазоне от 360 до 380°C. Показано, что при температурах 360 и 380°C расплав связующего ПЭКК-50П термостабилен не менее 2 ч. Методом прессования при температурах 360 и 380°C изготовлены образцы углепластика и определены их физико-механические характеристики [50].

Исследованы характеристики огнестойкости и пожаробезопасности листового углепластика ВКУ-65 на основе полиэфирэфиркетона и углеткани саржевого плетения, а также влияние на свойства материала различных эксплуатационных факторов. Установлено соответствие материала авиационным правилам по горючести и дымообразованию. Подтверждена устойчивость к термическому старению при температурах 120 и 150°C, воздействию температур от минус 60 до плюс 150°C, повышенной влажности, плесневых грибов и агрессивных жидкостей [51].

Статья [52] посвящена разработке материалов для 3D-печати методами селективного лазерного спекания (SLS) и послойного наплавления (FDM) на основе полиэфирэфиркетона зарубежного производства. Технологии 3D-печати позволяют изготавливать авиационные детали и конструкции сложной геометрической формы за единый технологический цикл с минимальными трудозат-

ратами при минимальном количестве отходов. Приведены результаты исследования свойств композиций для переработки SLS и FDM методами на основе полиэфирэфиркетонов производства фирмы Zyrcek (Китай) марок 550PF и 330UPF, а также производства компании Victrex (Англия) марок 90G, 150G и 380G. Сформулированы основные требования к таким композициям и принципы их подготовки к переработке [52].

Термические, механические и трибологические свойства нового керамико-полимерного нанокompозита, в котором полимер ПАЭК армирован карбидом кремния титана ( $Ti_3SiC_2$ ), керамическим наноламинатом, принадлежащим к фазовому семейству MAX (M – ранний переходный металл, A представляет собой элемент группы IIIA или IVA, а X представляет собой углерод и/или азот), о которых сообщается впервые в работе [53]. Нанокompозиты ПАЭК– $Ti_3SiC_2$  с различной объемной долей  $Ti_3SiC_2$  были обработаны методом горячего прессования. Проведен систематический анализ влияния  $Ti_3SiC_2$  на тепловое расширение, объемную твердость, механическую прочность, износостойкость и фрикционные свойства. Новый наноламинат фазы MAX был впервые использован в качестве многофункционального армирующего материала для получения термически стабильного полимерного композита ПАЭК, с низким коэффициентом трения и низким износом без ущерба для свойственной ему обрабатываемости. Полезные свойства, реализуемые наноламинатами  $Ti_3SiC_2$ , включают повышенную температуру термического разложения и рекристаллизации, повышение как минимум на 50% механической твердости, прочности на изгиб и сжатие и снижение значений теплового расширения примерно на 40% [53].

Для решения задачи одновременного придания ПЭЭК свойств прочности и износостойкости созданы антифрикционные многокомпонентные композиты на основе ПЭЭК [54]. Для этого, параллельно с введением твердосмазочных частиц (политетрафторэтилен (ПТФЭ), дисульфид молибдена ( $MoS_2$ ), графит и др.), добавляли рубленые углеродные (армирующие) волокна. Исследованы механические и триботехнические характеристики трехкомпонентных (армированных) композитов на основе ПЭЭК с различными твердосмазочными наполнителями (ПТФЭ и  $MoS_2$ ) в условиях сухого трения скольжения.

В работе [55] изучено адгезионное взаимодействие между ПЭЭК и полиметилметакрилатным акриловым полимером для зубных протезов, влияние предварительной обработки и кондиционирования на прочность сцепления при сдвиге, свободную энергию поверхности и шероховатость поверхности между ПЭЭК и полиметилметакрилатом (ПММА) холодного отверждения. Увеличение размера частиц и давления привело к одинаковым или повышенным значениям прочности сцепления при сдвиге, характеристической прочности Вейбулла и модулей Вейбулла. Самые низкие результаты наблюдались для группы образцов без воздушно-абразивной обработки, а обработка  $Al_2O_3$  показала самые высокие значения. Для улучшения адгезии между ПЭЭК и ПММА рекомендована предварительная обработка заготовок  $Al_2O_3$ .

Большое количество информации посвящено использованию ПЭЭК в 3D печати [56–68]. ПАЭК являются хорошей заменой имплантируемых металлов благодаря их биосовместимости, свойствам остеоинтеграции, значительной прочности адгезии, гибкости, рентгенопрозрачности и сопоставимому модулю изгиба, подобному костному. В последнее время аддитивное производство индивидуальных 3D-печатных имплантатов с использованием методов быстрого прототипирования использовалось для хирургических и медицинских имплантаций. Кроме того, быстрый технологический прогресс, моделирование методом наплавления и селективное лазерное спекание в сочетании с усовершенствованными технологиями визуализации упростили критические недостатки технологичности традиционных полукристаллических термопластичных полимеров [62].

В последние годы появилось большое количество публикаций, посвященных применению ПАЭК в медицине [69–84]. В медицине ПАЭК используются, например, для изготовления имплантатов. ПАЭК обладает высокой биосовместимостью, что делает его хорошим материалом для изготовления различных видов имплантатов, таких как ортопедические имплантаты (например, для

замены суставов), зубные имплантаты и другие. ПАЭК используется для изготовления медицинских инструментов, благодаря своей высокой прочности, стойкости к химическим воздействиям и возможности стерилизации. ПАЭК могут быть использованы для изготовления костных пластин и винтов, которые применяются в хирургии для фиксации костей при переломах или других хирургических вмешательствах. ПАЭК могут использоваться для создания стерильных контейнеров и упаковки для медицинских инструментов и устройств.

Как показал анализ научной и патентной литературы, ПАЭК – это класс полимерных материалов, которые набирают популярность в различных отраслях благодаря комплексу уникальных эксплуатационных характеристик. Потребность в ПАЭК на рынке с каждым годом будет возрастать. Поэтому вопросы, касающиеся усовершенствования способов получения ПАЭК и различных сополимеров и композитов на его основе, новых областей применения, будут актуальны, будет возрастать интерес научного и технологического сообщества к этому классу полимеров.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00370.

## Литература

1. Фитерман С.И., Шарафутдинов Э.Р., Онегов Н.А., Руднев Н.А. Обзор свойств и способов получения полиэфирэфиркетона // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2024. №2. С. 167–194. DOI: 10.17122/ogbus-2024-2-167-194.
2. Хараев А.М., Бажева Р.Ч. Полиэфирэфиркетон: синтез, свойства, применение (обзор). Пластические массы. 2018, №7–8, с. 15–23. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2018-7-8-15-23>.
3. Алексеев В.М., Гуреньков В.М. Особенности синтеза полиэфирэфиркетона методом нуклеофильного замещения // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31, №11(192). С. 11–13.
4. Шапошникова В.В. Салазкин С.Н. Направленный синтез термо- и теплостойких полиарилэфиркетонных, обладающих комплексом ценных функциональных свойств // Российский химический журнал. 2023. Т. 67, №4. С. 37–42. DOI: 10.6060/rcj.2023674.7.
5. Шапошникова В.В. Салазкин С.Н. Конденсационные тройные сополимерные полиарилэфиркетонные: синтез и свойства // Российский химический журнал. 2021. Т. 65, №3. С. 72–78. DOI 10.6060/rcj.2021653.10.
6. Шапошникова В.В. Салазкин С.Н. Исследования синтеза и свойств полиарилэфиркетонных // Известия Академии наук. Серия химическая. 2014. №10. С. 2213. DOI: 10.1007/s11172-014-0725-1.
7. Сорокин А.Е., Краснов А.П., Клабукова Л.Ф., Шапошникова В.В., Наумкин А.В. Изучение свойств полиарилэфиркетонных // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. 28, №3(152). С. 77–79.
8. Саламов А.Х., Микитаев А.К., Беев А.А., Беева Д.А., Лигидов М.Х., Пахомов С.И. Получение полиарилэфиркетонных реакцией нуклеофильного замещения // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2016. Т. 59, №7. С. 4–16. <https://doi.org/10.6060/tcct.20165907.5389>.
9. Саламов А.Х., Микитаев А.К., Беев А.А., Беева Д.А., Кумышева Ю.А. Полиэфирэфиркетон (ПЭЭК) как представители ароматических полиарилэфиркетонных // Фундаментальные исследования. 2016. №1–1. С. 63–66. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39794>.
10. Peng Chen, Haoze Wang, Jin Su, Yujia Tian, Shifeng Wen, Bin Su, Cao Yang, Binling Chen, Kun Zhou, Chunze Yan, Yusheng Shi. Recent Advances on High-Performance Polyaryletherketone Materials for Additive Manufacturing // Advanced Materials: V. 34, I. 52. <https://doi.org/10.1002/adma.202200750>.
11. Хараев А.М., Бажева Р.Ч. Полиэфиркетон: синтез, структура, свойства, применение (обзор) // Пластические массы. 2013. №8. С. 13–19. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2013-8-13-15-23>.
12. Саламов А.Х., Микитаев А.К., Беев А.А., Беева Д.А. Синтез полиэфиркетонных и полиэфирэфиркетонных // Современные наукоемкие технологии. 2016. №4-1. С. 53–56. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=3577>.

13. Саламов А.Х. Методы синтеза полиэфиркетонов и полиэфирэфиркетонов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2019. Т. 9, №1. С. 72–76.
14. Патент № 2776849 Российская Федерация, МПК C08G 65/00 (2022.02); C08G 65/4012 (2022.02); C08G 65/4093 (2022.02); C08G 61/127 (2022.02) Оpubл. 27.07.2022. Способ получения полиэфирэфиркетона: №2021121635: заявл. 21.07.2021: опубл. 27.07.2022.
15. Хаширова С.Ю., Жанситов А.А., Шахмурзова К.Т., Курданова Ж.И., Слонов А.Л., Байказиев А.Э., Мусов И.В. Синтез и свойства полиэфиркетона для применения в аддитивных технологиях // Известия Академии наук. Серия химическая. 2023. Т. 72, №2. С. 546–552.
16. Патент № 2673242 Российская Федерация, МПК C08G 65/40 (2006.01); C08G 65/46 (2006.01). Способ получения полиэфиркетона: № 2018123326: заявл. 27.06.2018: опубл. 23.11.2018.
17. Гуреньков В.М., Горшков В.О., Чеботарев В.П., Прудскова Т.Н., Андреева Т.И. Сравнительный анализ свойств полиэфиркетона отечественного и зарубежного производства // Авиационные материалы и технологии. 2019. №3. С. 41–47. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-41-47
18. Патент № 2709448 Российская Федерация, C08L 81/02 (2006.01). Полимерная композиция на основе термопластичного ароматического полиэфирэфиркетона: № 2019119392: заявл. 21.06.2019: опубл. 17.12.2019.
19. Патент № 2670441 Российская Федерация, C08G 65/40 (2006.01). Способ получения капсулированного ароматического огнестойкого полиэфирэфиркетона: №2017140398: заявл. 20.11.2017: опубл. 23.10.2018.
20. Патент № 2684329 Российская Федерация, МПК B01J 13/02 (2006.01); C08G 65/40 (2006.01) Ароматические полиэфирэфиркетоны, сополиэфирэфиркетоны и способ их капсулирования: № 2018133122: заявл. 18.09.2018: опубл. 08.04.2019.
21. Патент № 2497839 Российская Федерация, МПК C08G 65/40 (2006.01); C08G 65/42 (2006.01); C07C 43/02 (2006.01); C07C 43/257 (2006.01); C07C 43/29 (2006.01). Огнестойкие блок-сополиэфиры: №2012113762/04: заявл. 06.04.2012: опубл. 10.11.2013.
22. Патент № 2497841 Российская Федерация, МПК C08G 75/20 (2006.01); C08G 63/133 (2006.01); C08G 63/688 (2006.01) Ненасыщенные блок-сополиэфирсульфоны: №2012113763/04: заявл. 06.04.2012. опубл. 10.11.2013.
23. Хараев А.М., Бажева Р.Ч., Хараева Р.А., Бесланеева З.Л., Бегиева М.Б. Синтез и свойства ненасыщенных блок-сополиэфиркетонов. Пластические массы. 2024. №1. С. 27–30. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-01-27-30>.
24. Хараев А.М., Бажева Р.Ч., Инаркиева З.И., Парчиева М.М., Хараева Р.А., Бесланеева З.Л. Ароматические сополиэфирэфиркетоны // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2023. № 9. С. 14–18. DOI: 10.31044/1994-6260-2023-0-9-14-18.
25. Хараев А.М., Шаов А.Х., Бажева Р.Ч. Свойства полиэфирэфиркетонов блочного строения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2021. №9. С. 36–41. DOI: 10.31044/1994-6260-2021-0-9-36-41.
26. Kalinnikov A.N., Borodulin A.S., Kharaev A.M. [et al.] Polyether-ketones based on 1,1-dichloro-2,2-di(3,5-dibromo-4-hydroxyphenyl) ethylene // Key Engineering Materials. 2019. V. 816. P. 302–306. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.816.302.
27. Патент № 2673547 Российская Федерация, МПК C08G 64/16 (2006.01); C08K 3/34 (2006.01); C08K 9/04 (2006.01). Способ получения полиэфиркетонов: №2012113763/04: заявл. 06.04.2012: опубл. 28.11.2018.
28. Патент № 2669793 Российская Федерация, МПК C08G 65/40 (2006.01). Способ получения полиэфиркетонов: №2018107181: заявл. 26.02.2018: опубл. 16.10.2018.
29. Инаркиева З.И. Ароматические полиэфиркетоны на основе гидрохинона и бисфенолов различного химического строения: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Нальчик, 2016. 22 с.
30. Патент № 2775568 Российская Федерация, МПК C08G 65/40 (2006.01); C07C 45/46 (2006.01); C08G 61/12 (2006.01); C08G 67/00 (2006.01). Способ получения комплекса 1,3-бис(4-феноксibenзоил)бензол-кислота Льюиса и полиэфиркетонкетона на его основе: № 2020144084: заявл. 30.12.2020: опубл. 04.07.2022.
31. Патент № 2791106 Российская Федерация, МПК C07C 45/46 (2006.01); C08G 8/02 (2006.01); C08G 65/46 (2006.01). Способ получения полиэфиркетонкетона: №2022122083: заявл. 15.08.2022: опубл.02.03.2023.
32. Патент № 2756466 Российская Федерация, МПК D01F 6/66 (2006.01); D01D 5/06 (2006.01). Процесс для производства волокон из полиэфиркетонкетона: №2019114700: заявл. 08.11.2017: опубл. 30.09.2021.
33. Jingzhao Shang, Ping Song, Guanghui Li, Qingmin Sun, Yang Li & Zhiyong We. Crystallization and melting behavior of poly(ether ketone ketone) (PEKK) copolymers synthesized by facile one-step method // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. V. 148. P. 11727–11741. DOI:10.1007/s10973-023-12518-1.
34. Yang X., Luo J., Ren H, Xue Yi, Chenxi Ya., Yuan T., Yang Z., Liu Y., Zhang H., Yu J. Simultaneously improving the EMI shielding 10 performances and mechanical properties of CF/PEKK composites via MXene interfacial modification // Journal of Materials Science & Technology. V. 154. 2023. P. 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.01.020>.
35. Sandra L. Aristizábal, Lakshmeesha Upadhyaya, Maik Tepper. Poly(aryl ether ketone) hollow fibers preparation with acid resistant spinnerets // Journal of membrane Science. 2023. V.674. Article 121566. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121436>.
36. Sandra L. Aristizábal, Lakshmeesha Upadhyaya, Gheorge Falca, Abaynesh Yihdego Gebreyohannes, Mohammed Omer Aijaz, Mohammad Rezaul Karim, Suzana P. Nunes. Acid-free fabrication of polyaryletherketone membranes // Journal of Membrane Science. 2022. V. 660. Article 120798. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120798>.
37. Sun S., Jin Z., Liu X., Han Z., Wang Y. In situ consolidation process-based fabrication and interlaminar modification mechanism associated with CF/PEEK multiscale nanocomposites characterized by interlaminar doping of CNTs // Composites Science and Technology. 2022. 222. P. 109356. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109356>.
38. Zhang D., Huang Y. The bonding performances of carbon nanotube (CNT)-reinforced epoxy adhesively bonded joints on steel substrates // Progress in Organic Coatings. 2021, 159. P. 106407. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106407>.
39. He Y., Zhang J., Yao L., Tang J., Che B., Ju S., Jiang D. A multi-layer resin film infusion process to control CNTs distribution and alignment for improving CFRP interlaminar fracture toughness // Composite Structures. 2021. 260. P. 113510. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113510>.
40. Yildiz K., Gürkan İ., Turgut F., Cebeci F.Ç., Cebeci H. Fracture toughness enhancement of fuzzy CNT- glass fiber reinforced composites with a combined reinforcing strategy // Composites Communications. 2020. 21. P. 100423. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100423>.
41. Szałkowski P., Czechowski L., Gralewski J., Szałkowska M. Mechanical Properties of Poly(lactide Admixed with Carbon Nanotubes or Graphene Nanopowder // Materials. 2021. 14. P. 5955. DOI 10.3390/ma14205955.
42. Xu Yan, Liang Qiao, Hao Tan, Hongsheng Tan. Effect of Carbon Nanotubes on the Mechanical, Crystallization, Electrical and Thermal Conductivity Properties of CNT/CCF/PEKK Composites // Materials. 2022. 15(14). P. 4950. DOI:10.3390/ma15144950.
43. Qiao L., Zhu K., Tan H., Yan X., Zheng L., Dong S. Effect of carbon nanotubes on the electrical, thermal, mechanical properties and crystallization behavior of continuous carbon fiber reinforced polyether-ether-ketone composites // Materials Research Express. 2021. 8. P. 045312. DOI 10.1088/2053-1591/abf6f9.
44. Yan X., Qiao L., Tan H., Liu C., Zhu K., Lin Z., Xu S. Effect of Carbon Nanotubes on the Mechanical, Crystallization, Electrical and Thermal Conductivity Properties of CNT/CCF/PEKK Composites // Materials. 2022. 15. 4950. <https://doi.org/10.3390/ma15144950>.
45. Соловьев А.А., Ляшенко Е.Ю., Комолов М.Б., Яковлева К.А. Исследование кинетики кристаллизации полиэфирэфиркетона с низким значением показателя текучести расплава в изотермическом режиме. Пластические массы. 2021;1(11-12):12-14. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-11-12-12-14>.
46. Шилько С.В., Гавриленко С.Л., Панин С.В., Алексенко В.О., Анализ вязкоупругих свойств полиэфирэфиркетона и дисперсно-наполненных композитов на его основе по данным ускоренных релаксационных испытаний. // Актуальные вопросы машиноведения. 2019. Выпуск 8. С. 308–309.

47. Ляшенко Е.Ю., Яковлева К.А., Андреева Т.И., Прудскова Т.Н., Кравченко Т.П., Горбунова И.Ю., Давидьянц Н.Г. Композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетона. Пластические массы. 2023;1(1-2):11-13. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-1-2-11-13>.
48. Quan Yang, Guangcheng Zhang, Zhonglei Ma, Jiantong Li, Xiaolong Fan. Effects of processing parameters and thermal history on microcellular foaming behaviors of PEEK using supercritical CO<sub>2</sub> // *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. Article 42576. DOI: 10.1002/app.42576.
49. Панин С.В., Нгуен Д.А., Бочкарева С.А. и др. Оптимизация состава композиций на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) с заданными трибомеханическими свойствами // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16, № 3. С. 331–338. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2019.03.007.
50. Павлюкович Н.Г., Иванов М.С., Морозова В.С., Донских И.Н. Исследование термостабильности расплава полиэфирэфиркетона марки ПЭЭК-50П и углепластика на его основе // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. №2. С. 90–98. DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-90-98.
51. Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние эксплуатационных факторов на свойства углепластика на основе полиэфирэфиркетона // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. №2. С. 44–51. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-44-51.
52. Кирил.Б.С., Лонский С.Л., Петрова Г.Н., Сорокин А.Е. Материалы для 3D-печати на основе полиэфирэфиркетон // *Труды ВИАМ*. 2019. N 4(76). С. 21. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-21-29
53. Mahesh K.V., Balanand S., Raimond R., Peer Mohamed A., Ananthakumar S. Polyaryletherketone polymer nanocomposite engineered with nanolaminated Ti3SiC2 ceramic fillers // *Materials & Design*. 2014. V.63. P. 360–367. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.06.034.
54. Панин С.В., Нгуен Д.А., Корниенко Л.А., Иванова Л.Р. Антифрикционные многокомпонентные композиты на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) // *Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. Материалы 9-ой международной научно-технической конференции*. 2019. С. 152. <https://doi.org/10.1063/1.5122124>.
55. Mayinger F., Fiebig M., Roos M., Eichberger M., Lümekmann N., Stawarczyk B. Bonding behavior between polyetheretherketone and polymethylmethacrylate acrylic polymer for dental prostheses // *J. Adhes Dent*. 2021. 23(2). P. 145–158. DOI: 10.3290/j.jad.b1079579.
56. Başgul C, Yu T, MacDonald DW, Siskey R, Marcolongo M, Kurtz SM. Structure-Property Relationships for 3D printed PEEK Intervertebral Lumbar Cages Produced using Fused Filament Fabrication. // *Journal of Materials Research*. 2018. 33(14). P. 2040–2051. <https://doi.org/10.1557/jmr.2018.178>.
57. Jana Herzberger, Justin M. Serrine, Christopher B. Williams, Timothy E. Long. Polymer Design for 3D Printing Elastomers: Recent Advances in Structure, Properties, and Printing. *Progress in Polymer Science*. V.97. 101144. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.101144>.
58. Steven Pollack, Chaitra Venkatesh, Martin Neff, Andrew Vincent Healy. Polymer-Based Additive Manufacturing: Historical Developments, Process Types and Material Considerations. In book: *Polymer-Based Additive Manufacturing* (PP. 1–22). DOI: 10.1007/978-3-030-24532-0\_1.
59. Ali Reza Zanjanijam, Ian Major, John G. Lyons, Declan M. Devine. Fused Filament Fabrication of PEEK: A Review of Process-Structure-Property Relationships // *Polymers*. 2020. 12. 1665. DOI: 10.3390/polym12081665.
60. Păcurar Răzvan, Negrea Diana, Sabău Emilia Comșa Dan Sorin, Borzan Cristina, Vitković Nikola, Rybarczyk Justyna, Păcurar Anuța Research on Mechanical Characteristics of 3D-Printed PEEK Material-Based Lattice Structures for Vertebral Implants. // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. P. 95–107. DOI: 10.1007/978-3-031-56456-7\_8.
61. Vanessa Moby, Lucien Dupagne, Vincent Fouquet, Jean-Pierre Attal, Philippe François and Elisabeth Dursun. Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling of Polyetheretherketone (PEEK) and Interest for Dental Restorations: A Systematic Review. // *Materials* 2022. 15(19). 6801. [doi.org/10.3390/ma15196801](https://doi.org/10.3390/ma15196801).
62. Banerjee K., Debroy M., Vamsi Krishna B., Bodhak S. Recent progress in creating high-performance 3D printed polyaryletherketone polymer implants for musculoskeletal reconstruction // *Journal of Materials Research*. 2021. V. 36(19). P. 3877–3893. DOI: 10.1557/s43578-021-00231-4.
63. Chikkanna N., Krishnapillai Sh., Kumar Sh., Velmurugan R. Application of PEEK in total cervical disc arthroplasty: A review // *Materials Today: Proceedings*. 2023. V. 87, Part 1. P. 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.435>.
64. Lijun Deng, Yi Deng, Kenan Xie. AgNPs-decorated 3D printed PEEK implant for infection control and bone repair // *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2017. 160. 483–492. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2017.09.061.
65. Zhao F., Lee D., Jin Z. Preliminary study of polyether-ether-ketone based on fused deposition modeling for medical application // *Materials*. 2018. 11. P. 288. <https://doi.org/10.3390/ma11020288>.
66. Labdhi M Maloo, Sumeet H Toshniwal, Amit Reche, Priyanka Paul, Mayur B Wanjari A. Sneak Peek Toward Polyaryletherketone (PAEK) Polymer: A Review // *Cureus*. 2022. 14(11). DOI: 10.7759/cureus.31042.
67. Виндижева А.С., Хаширова С.Ю., Хараева З.Ф. и др. Использование полиэфирэфиркетона и композитов на его основе в медицинской практике // *Известия Кабардино-Балкарского государственного университета*. 2023. Т. 13, №2. С. 66–73.
68. Салазкин С.Н., Шапошникова В.В. Полиарилэфиркетон – термо-, тепло- и хемостойкие термопласты и перспективы создания различных материалов на их основе // *Высокомолекулярные соединения. Серия С*. 2020. Т. 62, №2. С. 108–121. DOI: 10.31857/S2308114720020120.
69. Шереметьев С.В., Сергеева Е.А., Бакирова И.Н., Зенитова Л.А., Абдуллин И.Ш. Использование полиэфирэфиркетона в медицине и других отраслях промышленности. Обзор // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. С. 164–167.
70. Рузиев Х.Х., Древаль О.Н., Басков А.В. Компрессионные несложные переломы позвоночника: современные аспекты лечения // *Вестник экстренной медицины*. 2018. Т. 11, №3. С. 77–80.
71. Sharif F., Roman S., Asif A., Gigliobianco G., Ghafoor S., Tariq M., Siddiqui S.A., Mahmood F., Muhammad N., Ur Rehman I., Mac Neil Sh. Developing a synthetic composite membrane for cleft palate repair // *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*. 2019. V. 13, N 7. P. 1178–1189. DOI: 10.1002/term.2867.
72. Ahmed A., Gibson K., Ayliffe P. Technical note Use of polydioxanone sheet to repair palatine fistulas in patients with cleft palate // *Br. J. Oral Maxillofac. Surg*. 2013. V. 51. P. e197–e198. DOI: 10.1016/j.bjoms.2012.05.016.
73. Panayotov I.V., Orti V., Quisigne F., Yachou J. Polyetheretherketone (PEEK) for medical use // *J. Mather. Scientific Mater. S*. 2016. V. 27, N 7. P. 118. DOI: 10.1007/s10856-016-5731-4.
74. Punchak M., Chang L.K., Lagman K., Bui T.T., Lazareff J., Rezzadeh C., Jarrayh R., Young I. Results of polyetherketone (PEEK) cranioplasty: a systematic review and meta-analysis // *J. Klin. Neurologists*. 2017. V. 41. P. 30–38. DOI: 10.1016/j.jocn.2017.03.028.
75. Gultan T., Yurcever M.Ts., Gümüsderelioglu M. NaOH/boron-etched nanohydroxyapatite-coated PEEK implants enhance osteogenic cell proliferation and differentiation // *Biomed. Mater*. 2020. V. 15, N 3. P. 19–35. DOI: 10.1088/1748-605X/ab7198.
76. Liu H., Jiang N., Li Y., Zhang D. Enhancing CF/PEEK interfacial adhesion with modified PEEK grafted with carbon nanotubes // *Scientific compositions. Tekhnol*. 2021. P. 210. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108831>.
77. Lu K., Qiu X., Lu S., Wang J., Xiao L., Zheng T., Wang S., Zhang D. Improving the interfacial strength of carbon fiber/polyetherketone hybrid composites using plasma treatment // *Polymers*. 2019. V. 11, N 5. P. 19. <https://doi.org/10.3390/polym11050753>.
78. Yang K., Ouyang L., Wang W., Chen B., Liu W., Yuan S., Luo Y., Cheng T., Yung K.V.K., Liu S., Zhang S. Sodium butyrate-modified sulfonated polyetheretherketone modulates macrophage behavior and exhibits enhanced antibacterial and osteogenic functions in implant-associated infections // *J. Mather. Chem. B*. 2019. V. 7, N 36. P. 5541–5553. <https://doi.org/10.1039/C9TB01298B>.
79. He X., Deng Yu., Yu Y., Liu H., Liao L. Drug-loaded/grafted peptide-modified porous PEEK modified with a drug/grafted peptide promotes bone repair and elimination of bacteria // *Colloidal surf. B Biointerfaces*. 2019. V. 181. P. 767–777. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2019.06.038.
80. Виндижева А.С., Хаширова С.Ю., Хараева З.Ф., Гавашели В.Ш., Долбин И.В., Хаширова А.А. Использование полиэфирэфир-

- кетона и композитов на его основе в медицинской практике // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2023. Т. 13, №2. С. 66–73.
81. Адамян Г.Г., Молдованов И.А., Подопригора А.В., Крючков М.А. Экспериментальная оценка применения полиэфирэфиркетона при изготовлении съёмных покрывных протезов с опорой на дентальные имплантаты // Прикладные информационные аспекты медицины. 2023. Т. 26, №3. С. 4–8. <https://doi.org/10.18499/2070-9277-2023-26-3-4-8>.
82. Хараева З.Ф., Хаширова С.Ю., Виндижева А.С., Гринева Л.Г. Перспективы применения полимеров и полимерных композиционных материалов в реконструктивной хирургии // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2022. Т. 12, №3. С. 105–111.
83. Адамян Г.Г., Митронин В.А., Подопригора А.В. и др. Использование полиэфирэфиркетона для изготовления телескопических коронок в съёмном протезировании с опорой на дентальные имплантаты // Cathedra-Кафедра. Стоматологическое образование. 2021. №76. С. 42–45.
84. Туркина А.Ю., Щелкова В.В., Макеева И.М. и др. Исследование антибактериальных свойств полиэфирэфиркетона в отношении *Staphylococcus aureus in vitro* // Клиническая стоматология. 2024. Т. 27, N 2. С. 46–51. DOI: 10.37988/1811-153X\_2024\_2\_46.
- 
-