

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРА РЕЕК В ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ХИРУРГИИ И СТОМАТОЛОГИИ: РЕАЛИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)¹

THE REALITIES AND PROSPECTS OF USING PEEK POLYMER IN MAXILLOFACIAL SURGERY AND DENTISTRY: A LITERATURE REVIEW

S. Mustafayeva
M. Mustafayev
F. Mustafayeva
I. Gabuyev
A. Vorokov
F. Dyshekova

Summary. Relevance. The main applications of polymers in medicine include a wide range of areas where these materials can be used to create various medical devices and implants. Among such polymers, a special place is occupied by polyetheretherketone (PEEK), a high-performance thermoplastic polymer. Its physico-chemical properties, such as high strength, corrosion resistance, biostability and biocompatibility, make it a promising material for the creation of implants, prostheses, abutments and other medical devices.

The purpose of the study. To analyze the feasibility of using and determine the direction of further study of the PEEK polymer as a material for the manufacture of prostheses, implants and other devices used in maxillofacial, reconstructive facial surgery, dentistry and oral surgery.

Materials and methods. The article provides a review of the literature on current and promising areas of application of PEEK polymer in maxillofacial and reconstructive surgery and dentistry. The main advantages of this material, its possible applications, as well as the latest scientific research and clinical observations confirming the effectiveness and safety of using PEEK in medical practice are considered. The analysis of the disadvantages of the polymer described in the literature and ways to eliminate them is carried out.

Results. Polyetheretherketone has excellent resistance to abrasive wear and low temperature sensitivity, which makes it optimal for use in medical devices such as implants, prostheses and instruments. The prospects of this material in 3D technologies used in reconstructive surgery are also highly assessed. The main advantages of the material include X-ray transparency, biocompatibility, lightness, shock-absorbing effect, high thermal stability and aesthetic properties. The main disadvantage of PEEK is the lack of the ability to osseointegrate, however, this problem can be corrected.

Conclusions. Modern research and clinical observations show that the use of PEEK polymer in dentistry and maxillofacial surgery is highly effective and reliable. However, the long-term results of using PEEK in vivo, in particular, microbial adhesion to the polymer, properties affecting the formation of microbial biofilm, need further study.

Keywords: PEEK, polyetheretherketone, polymers, polymer dental implants, polymers in reconstructive surgery.

Мустафаева Софият Магометовна

к.м.н., ассистент,
 ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный
 университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик
 666238@mail.ru

Мустафаев Магомет Шабазович

д.м.н., профессор,
 ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный
 университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик
 mustag@mail.ru

Мустафаева Фаризат Магометовна

к.м.н.,
 ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный
 университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик
 farident@mail.ru

Габуев Ильяс Керамович

Ассистент,
 ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный
 университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик
 ilias07-07@mail.ru

Вороков Астемир Асланович

Ординатор,
 ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный
 университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик
 assvorokov15@gmail.com

Дышекова Фатима Хасановна

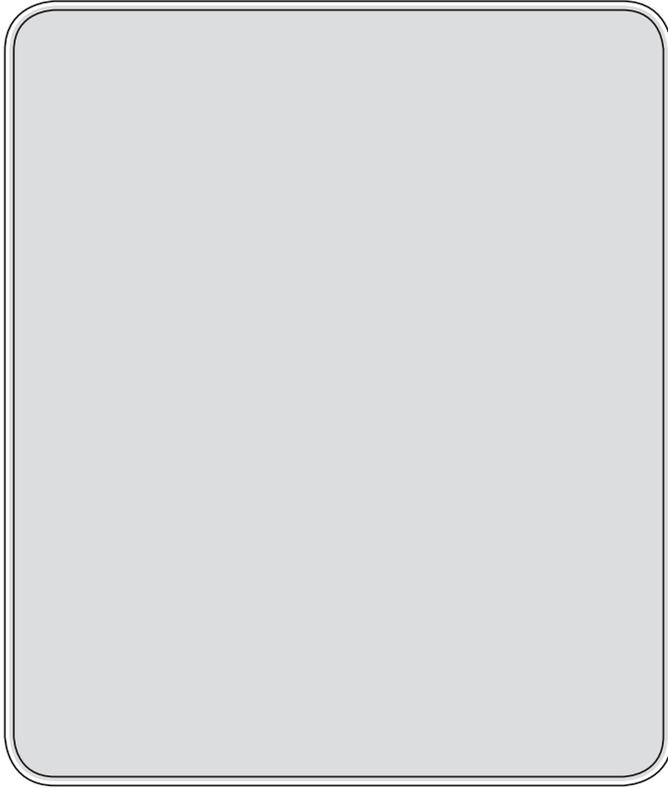
Ассистент,
 ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный
 университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик
 f.dyshekova@bk.ru

Аннотация. Актуальность. Основные направления применения полимеров в медицине включают в себя широкий спектр областей, где эти материалы могут быть использованы для создания различных медицинских устройств и имплантатов. Среди таких полимеров особое место занимает полиэфирэфиркетон (PEEK) — высокопроизводительный термопластичный полимер. Его физико-химические свойства, такие как высокая прочность, устойчивость к коррозии, биосовместимость, биостойкость и биocompatibility, делают его перспективным материалом для создания имплантатов, протезов, абатментов и других медицинских изделий.

Цель исследования. Анализ целесообразности использования и определение направления дальнейшего изучения полимера РЕЕК в качестве материала для изготовления протезов, имплантатов и иных приспособлений, используемых в челюстно-лицевой, реконструктивной хирургии лица, стоматологии и хирургии полости рта.

Материалы и методы. В статье приведен обзор литературы по актуальным и перспективным направлениям применения полимера РЕЕК в челюстно-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, мнемокод FZZR-2023-005



Современную медицину сложно представить без технологий и материалов, способных восстановить или заместить утраченные и/или нефункциональные структуры живого организма. Основными группами биоматериалов, используемых при изготовлении имплантатов и иных медицинских устройств, являются металлы, керамика, полимеры, силиконы и композиты [1, 2].

В челюстно-лицевой, реконструктивной хирургии и стоматологии такие биоматериалы обычно применяются в качестве внутрикостных, поднадкостничных и подслизистых имплантатов и их супраструктур, внутри- и внеротовых лицевых протезов, съемных и несъемных зубных протезов, фиксирующих, obtурирующих, репонирующих и формирующих аппаратов и устройств для устранения врожденных и приобретенных дефектов и деформаций, последствий и осложнений травм, последствий удаления новообразований, осложненных воспалительных заболеваний и деструктивных процессов различной этиологии [3, 4].

Существует ряд требований, которые предъявляются к материалам для изготовления имплантатов и иных медицинских приспособлений, устанавливаемых в организм пациента. Наиболее важными из них являются безопасность для окружающих тканей, отсутствие канцерогенного, токсического и иных негативных воздействий на принимающий организм, отсутствие рисков потенциально опасных физических и химических взаи-

лицевой, реконструктивной хирургии и стоматологии. Рассмотрены основные преимущества этого материала, его возможные области применения, а также последние научные исследования и клинические наблюдения, подтверждающие эффективность и безопасность использования РЕЕК в медицинской практике. Произведен анализ описанных в литературе недостатков полимера и способов их устранения.

Результаты. Полиэфирэфиркетон обладает отличной сопротивляемостью абразивному износу и низкой температурной чувствительностью, что делает его оптимальным для использования в медицинских устройствах, таких как имплантаты, протезы и инструменты. Также высокой признана перспективность данного материала в 3D-технологиях, используемых в реконструктивной хирургии. К основным преимуществам материала относятся рентген-прозрачность, биосовместимость, легкость, амортизирующий эффект, высокая термическая стабильность и эстетические свойства. Главным недостатком РЕЕК признано отсутствие способности к остеоинтеграции, однако, данная проблема поддается корректированию.

Выводы. Современные исследования и клинические наблюдения показывают, что применение полимера РЕЕК в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии имеет высокую эффективность и надежность. Однако, долгосрочные результаты применения РЕЕК in vivo, в частности, микробная адгезия к полимеру, свойства, влияющие на формирование микробной биопленки, нуждаются в дальнейшем изучении.

Ключевые слова: РЕЕК, полиэфирэфиркетон, полимеры, дентальные имплантаты из полимеров, полимеры в реконструктивной хирургии.

модействий со средой, в которой происходит установка и функционирование имплантата, стерилизуемость, отсутствие благоприятных условий для микробной контаминации и ретенции, устойчивость в жидкостных и иных биологических средах организма, механическая прочность [5, 6].

До недавнего времени ведущая роль в качестве материалов для изготовления различных видов имплантатов в основном принадлежала металлам, таким, как титан, сплавы хрома, кобальта, молибдена, никеля, нержавеющей сталь. Однако с развитием медицинских технологий и усовершенствованием методик стали выявляться некоторые негативные свойства классически применяемых материалов. Базовые недостатки металлических сплавов заключаются в их склонности к созданию артефактов при проведении компьютерной или магнитно-резонансной томографии, а также в отсутствии амортизации после приживления ввиду разницы в жесткости с костными структурами реципиентной зоны [7].

Керамика также широко применяется в медицине благодаря хорошей биосовместимости с тканями организма, высокой прочности на сжатие и устойчивости к коррозии. Имплантаты из различных видов керамики, пройдя долгий эволюционный путь с экспериментами, направленными на модификацию в рамках устранения существующих недостатков (невысокой прочности на излом и деформационной способности, неудобства в использовании монолитных имплантатов и т.д.) стали

реальной и перспективной альтернативой металлическим имплантатам [8]. Однако, ввиду сложности технологического процесса изготовления модифицированных форм керамики, такие имплантаты являются дорогостоящими даже по сравнению с имплантатами из высококачественных сплавов титана.

Полимерные материалы используются в медицинских целях сравнительно недавно, однако уже очевиден ряд их преимуществ, обусловленных такими ключевыми характеристиками, как механическая прочность, жесткость и твердость при высоких температурах, стойкость к химическим воздействиям и гидролизу, высокие показатели устойчивости к износу и трению, стабильность форм и размеров, резистентность к высокоэнергетическому излучению (гамма-лучи и рентгеновское излучение), низкая внутренняя воспламеняемость и низкое дымовыделение при горении. Полимеры представлены в многообразии форм и сложных композиций (твердые вещества, волокна, пленки и гели) [9].

Полимер PEEK (полиэфирэфиркетон) — полимер семейства полиарилэфиркетонов (PAEK). С 1980-х годов полиарилэфиркетоны все чаще используются в качестве биоматериалов для травматологических, ортопедических и спинномозговых имплантатов [10]. Это семейство полимеров характеризуется прочностью, инертностью и биосовместимостью.

Полиэфирэфиркетон (PEEK) — это бесцветный полиароматический полукристаллический термопластичный полимер с механическими свойствами, благоприятными для применения в биомедицине. Формы полиэфирэфиркетона PEEK-LT1, PEEK-LT2 и PEEK-LT3 уже применяются в различных областях хирургии: в хирургии позвоночника, ортопедической хирургии, челюстно-лицевой хирургии [11]. Этот термопластик обладает высокой температурой стеклования (143°C) и плавления (334°C). Чистый полимер PEEK 381G сохраняет свою форму при температуре до 152°C, а армированные волокнами соединения — до 315°C (ISO R75) [12].

Множество исследований подтверждает эффективность, безопасность и перспективность применения полимера PEEK в челюстно-лицевой, реконструктивной хирургии, стоматологии и хирургии полости рта.

PEEK обладает многообещающими характеристиками в качестве альтернативы титановым зубным имплантатам, временным и постоянным абатментам для зубных имплантатов и зубным протезам благодаря своей химической стойкости, механическим свойствам, радиопрозрачности и простоте моделирования с помощью ручных сверл или фрез [13]. Обладает высокой ударной вязкостью, отличной эластичностью и прочностью на разрыв. Кроме того, PEEK обладает хорошей биосовместимостью

в сочетании с низкой растворимостью в воде и высокой химической и термической стабильностью. Благодаря своей резистентности к воздействию обширного ряда химических соединений, PEEK способен выдерживать значительные нагрузки в зубном ряду и обеспечивать устойчивость имплантата в тканях [14].

По сравнению с жесткими каркасными материалами, такими как оксид циркония и металлические сплавы, PEEK обладает низким модулем упругости, равным 4 ГПа, и эластичен, как кость, обеспечивая амортизирующий эффект и уменьшая нагрузки, передаваемые на опорные зубы [15]. Дополнительным преимуществом является легкий вес полимера, при прочности, выдерживающей прилагаемую силу до 1200 Н, что, по сравнению с максимальной силой жевания в 500 Н для человека, является достаточным запасом прочности [16].

В отличие от натуральных зубов, дентальные имплантаты интегрируются без образования периодонтальной связки. Традиционно используемые материалы, такие как титан, тантал и цирконий, обладают низкой эластичностью, что приводит к воздействию под неблагоприятным углом на имплантаты и кость. В масштабах макродвижений такие нагрузки могут нарушить естественный физиологический паттерн движений и отрицательно сказаться на дорсокранияльной мобильности, остеоинтеграции, привести к атрофии кости или проблемам с височно-нижнечелюстным суставом [17, 18].

Актуальной задачей пока остаются поиски метода улучшить остеоинтегративные свойства полиэфирэфиркетона, при этом избежав снижения его прочности. В литературе описываются эксперименты с изменением пористости PEEK [19], однако на данный момент не вполне ясно, как подобные модификации структуры могут отразиться на микробной адгезии к материалу.

При протезировании зубов с опорой на классических металлических имплантатах периодически возникают эстетические дефекты, связанные с «просвечиванием» имплантата сквозь окружающие мягкие ткани при недостаточной толщине наружной кортикальной пластинки челюсти, тонком биотипе слизистой оболочки и/или рецессии слизистой оболочки вокруг титанового имплантата [20]. Имплантаты из полимеров не создают подобных сложностей. Не меньшее значение имеет возможность соответствия высоким эстетическим требованиям пациента к ортопедической конструкции, создавая протезы, максимально приближенные к естественным зубам по внешнему виду: благодаря белому цвету каркасов PEEK можно избежать такой проблемы, как серый оттенок металлических каркасов [21].

Помимо вышесказанного, полимерная альтернатива титановым имплантатам значительно снижает стои-

мость имплантологического лечения [22], что является несомненным социальным аргументом в пользу дальнейшего развития направления применения РЕЕК.

Немаловажной является перспектива применения имплантатов и протезов из РЕЕК у пациентов, страдающих аллергией на металлы и отмечающих дискомфорт из-за металлического привкуса, а также пациентам, которым требуются реставрации без металла по иным причинам. Poli et al в своем литературном обзоре (2021) приводят статистику и возможные последствия непереносимости титана, в настоящее время являющегося абсолютным лидером среди материалов для изготовления дентальных имплантатов [23]. Другие авторы также отмечают значимость и недооцененность проблемы реакции непереносимости на титан в современной дентальной имплантологии [24, 25].

Maté Sánchez de Val и соавторы (2016) изучили поведение РЕЕК в качестве материала для изготовления абатментов на имплантатах и пришли к выводу, что биосовместимость материала в сочетании с благоприятной реакцией тканей делают его подходящей альтернативой традиционным титановым абатментам [26].

Схожие результаты обзора литературы на тему применения абатментов и формирователей десневой манжеты из полиэфирэфиркетона описывают Wiesli и соавторы (2015), подтверждая эффективность и безопасность использования полимера в данном качестве [27].

Также высокие оценки даны полимеру РЕЕК в качестве основного материала для изготовления съемных [28, 29] и несъемных [30, 31] протезов, одиночных коронок [32, 33, 34]. Наибольшее внимание уделяется таким позитивным особенностям полиэфирэфиркетона, как стабильные значения ретенционной нагрузки, превосходная гигротермическая стойкость, снижение концентрации напряжения в стержневой конструкции, высокий модуль прочности на разрыв [35, 36].

Однако, несмотря на очевидные плюсы и достоинства полиэфирэфиркетона, отраженные в значительном количестве научных трудов, большинство исследователей придерживается мнения о необходимости более отдаленных сроков наблюдения и контроля, в частности, в вопросах термомеханического старения материала, а также ранней жевательной нагрузки на временные коронки на имплантатах с абатментами из РЕЕК во фронтальном отделе [37].

Возрастает также число публикаций на тему применения полимеров в ортодонтии. Paglia и соавторы (2022) в своем обзоре произвели анализ литературы о перспективах и преимуществах использования РЕЕК в данном разделе стоматологии [38]. По мнению авторов

исследования, современная ортодонтия демонстрирует растущий спрос на безметалловые, индивидуальные и полностью цифровые материалы для изготовления ортодонтических приспособлений. Они акцентируют внимание на таких преимуществах полиэфирэфиркетона, как легкость, эстетичность и износостойкость. Однако, по-прежнему недостаточно информации о ретенционных свойствах при использовании в качестве ортодонтических аппаратов, противостоянии длительной динамической нагрузке, статическом трении или образовании биопленки на поверхности РЕЕК. Для оценки этих аспектов необходимы дополнительные клинические исследования.

В челюстно-лицевой травматологии все шире изучается возможность использования РЕЕК в качестве фиксирующих элементов при переломах костей лица в качестве альтернативы титановым пластинам. Результаты подобных клинических исследований подтверждают перспективность идеи [39, 40], в том числе у пациентов детского возраста [41]. Thomas и соавторы (2016) в своем анализе клинического случая описывают аллергическую реакцию в ответ на установку наконечной фиксирующей конструкции из сплава титана [42], что лишний раз свидетельствует об актуальности данного направления исследований.

К аналогичным выводам пришли авторы работ о применении пластин из полиэфирэфиркетона в ортогнатической хирургии, где среднее количество используемых у пациента фиксирующих приспособлений и оказываемая на них нагрузка значительно выше, чем при проведении остеосинтеза [43, 44].

В продолжение развития данного направления описаны результаты модификации РЕЕК наночастицами серебра с достижением выраженного антибактериального эффекта [45], что позволит сделать хирургические вмешательства более безопасными, а их результаты — более предсказуемыми.

При реконструкции структур височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС) все большее предпочтение отдается имплантатам РЕЕК для замены или укрепления поврежденных компонентов [46]. Долгое время существовавшая в восстановительной хирургии ВНЧС проблема несоответствия плотности металлических имплантатов суставной головки и костной ткани суставной впадины вынуждала при протезировании структур сустава заменять на металл не только пораженные, но и интактные части [47]. Преимущество полимерных имплантатов суставной головки минимизирует риск подобного дисбаланса и, как следствие, стираемости суставных структур.

Сталкиваясь с эстетическими недостатками, например, асимметрией средней зоны лица, хирурги все чаще

рассматривают имплантаты из РЕЕК как перспективный материал для эффективного увеличения объема или изменения формы лицевого скелета, что подтверждается отличными функциональными и эстетическими результатами [48, 49].

Одним из самых социально значимых направлений является разработка концепции максимальной эффективности и безопасности методик и конструкций, используемых в реконструктивной хирургии лица и головы у пациентов с врожденными деформациями, последствиями травм и удаления опухолей. За последние годы опубликовано множество клинических случаев, подтверждающих актуальность использования РЕЕК в подобных ситуациях, в частности, для замещения послеоперационных дефектов у онкологических больных [50, 51, 52, 53] и больных после обширных травм челюстно-лицевой области [54, 55].

Исследователи отмечают такие дополнительные преимущества полимеров, как рентген-прозрачность и, как следствие, отсутствие артефактов на КТ, что улучшает качество последующего рентгенологического контроля и мониторинга, а также планирования последующих этапов лечения у онкологических пациентов [56]; улучшение симметрии лица у пациентов после реконструктивных операций на черепе и костях лица по сравнению с традиционными методами восстановления тканей [57]; снижение частоты послеоперационных осложнений у пациентов после установки массивных имплантатов в связи с исключительной биосовместимостью [58].

Тем не менее, ряд авторов акцентирует внимание на том, что опубликованных на данный момент клинических исследований недостаточно, чтобы доказать превосходство РЕЕК над другими материалами в некоторых аспектах *in vivo* [59, 60, 61], а также рекомендует модификацию материала с применением гидроксиапатита [62, 63] и наночастиц металлов, обладающих способностью улучшить слабые интегративные свойства полимера [64, 65].

Не менее востребованным направлением в реконструктивной хирургии является изготовление и инвазивная фиксация obturаторов и внутри- и внеротовых лицевых протезов, использующихся у пациентов с обширными приобретенными вследствие травм и оперативных вмешательств дефектами твердых и мягких тканей лица и полости рта. Фиксация протезов в анапластологии чаще всего осуществляется при помощи магнитов или абатментов на предварительно установленных в костные структуры опоры. Obturаторы имеют и иные методы фиксации, например, к зубам, при помощи телескопических коронок, кламмеров и аттачменов. Очевидно, что подобные устройства должны быть легкими, биокомпатибельными, функциональными, надежно фиксируемыми и удобными в применении, чему полностью соответствуют устройства из полиэфирэфиркетона [66, 67].

Автоматизированное проектирование (CAD) — это процесс создания, модификации, анализа или оптимизации дизайна с использованием компьютерной системы. Автоматизированное производство (CAM) — это процесс планирования, управления или контроллинга производства с использованием компьютерной системы [68]. Методы проектирования для реконструкции черепно-челюстно-лицевых дефектов включают использование предоперационной 3D-модели, напечатанной с предоперационными данными, печать шаблона для интраоперационных манипуляций по результатам виртуальной операции, 3D-модель после виртуальной операции, напечатанную с восстановленными данными с использованием зеркального отображения, и изготовление индивидуальных имплантатов. Выбирая подходящий метод проектирования, производственный процесс и материал имплантата в зависимости от конкретного случая, можно добиться более точной хирургической процедуры, сократить время операции, предотвратить различные осложнения, которые могут возникнуть при использовании традиционного метода, и прогнозировать результаты по сравнению с традиционным методом [69].

Немаловажным аргументом в пользу имплантатов и протезов из полиэфирэфиркетона является возможность изменять дизайн и структуру с помощью 3D-печати. Благодаря своей подгонке под особенности конкретного пациента, такие имплантаты обеспечивают оптимальную поддержку и восстановление анатомических структур [70]. Эта технология позволяет изготавливать индивидуальные устройства, которые соответствуют анатомическим требованиям конкретных пациентов, что потенциально приведет к улучшению результатов хирургических вмешательств [71, 72].

В исследованиях также прослеживается тенденция к указанию на необходимость дальнейшего пристального изучения возможностей улучшить свойства полиэфирэфиркетона для устранения существующих недостатков, например, за счет усовершенствования биологического взаимодействия полимера со стволовыми клетками, остеобластами и фибробластами при помощи технологии быстрых нейтральных частиц [73]; нанесения наноразмерных многослойных покрытий на полимер [74, 75]. Bai Z, Zhao Y, Cui C et al. в своем обзоре (2024) рассматривают и анализируют существующие несовершенства РЕЕК и описанные в литературе способы их устранения путем нанесения органических (полимерных, белковых) и неорганических покрытий в виде соединений цинка, магния, стронция, никеля, тантала, кремния и др., а также клеточных структур и даже медикаментов, например, антибиотиков и нестероидных противовоспалительных препаратов, приходя к выводу о высокой перспективности дальнейших исследований в данном направлении [76].

Таким образом, анализ современной литературы наглядно демонстрирует широкий спектр применения полимера PEEK в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. Его уникальные свойства делают его ценным материалом для различных направлений лечения стоматологических и хирургических заболеваний, восстановления зубов и устранения челюстно-лицевых дефектов, и будущие исследования продолжат раскрывать потенциал этого полимера для развития современных

технологий в медицине. Существующие недостатки и отсутствие значительного количества отдаленных результатов в некоторых аспектах применения полиэфирэфиркетона и других полимеров, не умаляют их достоинств и открывающихся перед врачами и учеными возможностей для совершенствования методик и способов реабилитации пациентов, с использованием новейших материалов и их модификаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Загорский В.А. «Дентальная имплантация. Материалы и компоненты» Символ науки, no. 9–2, 2016, pp. 132–136.
2. Marin E, Boschetto F, Pezzotti G. Biomaterials and biocompatibility: An historical overview. *J Biomed Mater Res A*. 2020 Aug 1;108(8):1617–1633. doi: 10.1002/jbm.a.36930. Epub 2020 Mar 31. PMID: 32196949.
3. Тимофеев А.А. Хирургические методы дентальной имплантации. — К.: ООО «Червона Рута-Турс», 2012. — 128 с.
4. Гаджикулиев А.А. Реабилитация больных с дефектами верхней челюсти с использованием лечебных аппаратов на имплантатах. // Автореферат диссертации ... канд. мед. наук. — М., — 2002. — 23 с.
5. Робустова, Т.Г. Имплантация зубов (хирургические аспекты) / Т.Г. Робустова. Москва: Медицина, 2001. 560 с.
6. Параскевич В.Л. Дентальная имплантология. Основы теории и практики. — М.: Медицинское информационное агентство, 2006. — 400 с.
7. Borzan C, Berce P, Alin M, Grozav SD, Ceclan V (2013). An overview about the actual study of the use of PEEK in medical devices. Conference: 14th International Conference «Automation in Production Planning and Manufacturing», Zilina 2013.
8. Кирилова И. А, Садовой, М.А., Подорожная, В.Т., Буякова, С.П., & Кульков, С.Н. (2013). Керамические и костно-керамические имплантаты: Перспективные направления. *Хирургия позвоночника*, (4), 052–062.
9. Ramakrishna S, Mayer J, Wintermantel E, Leong KW, Biomedical applications of polymer-composite materials: a review, *Composites Science and Technology*, Volume 61, Issue 9, 2001, Pages 1189–1224, ISSN 0266-3538, [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00241-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00241-4).
10. Kurtz SM, Devine JN (2007). Peek biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. *Biomaterials*, 28(32), 4845–4869. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.07.013>.
11. Horák Z, Pokorný D, Fulín P, Slouf M, Jahoda D, Sosna A. Polyetheretherketon (PEEK) — I. část: Perspektivní materiál pro ortopedickou a traumatologickou praxi [Polyetheretherketone (PEEK). Part I: prospects for use in orthopaedics and traumatology]. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech*. 2010;77(6):463–9. Czech. PMID: 21223825.
12. Katzer A, Marquardt H, Westendorf J, Wening JV, von Foerster G. Polyetheretherketone—cytotoxicity and mutagenicity in vitro. *Biomaterials*. 2002 Apr;23(8):1749–59. doi: 10.1016/S0142-9612(01)00300-3. PMID: 11950045.
13. Silva LS, Batista VS. (2019). Polyether Ether Ketone: The High-Performance Polymer in Dentistry. *ARC Journal of Dental Science*.
14. Темкин ЭС, Дорожкина ЛГ, Егорова ДС. (2015). Восстановление дефектов зубного ряда при помощи имплантатов Peek Optima в сочетании с методикой Plasmolifting. *Волгоградский научно-медицинский журнал*, (2), 49–53.
15. Alexakou E, Damanaki M, Zoidis P, Bakiri E, Mouzis N, Smidt G, Kourtis S. PEEK High Performance Polymers: A Review of Properties and Clinical Applications in Prosthodontics and Restorative Dentistry. *Eur J Prosthodont Restor Dent*. 2019 Aug 29;27(3):113–121. doi: 10.1922/EJPRD_01892Zoidis09. PMID: 31433133.
16. Bachir ES, Bechir A, Gioga C, Manu R, Burcea A, Dascalu IT. The advantages of BioHPP polymer as superstructure material in oral implantology. *Mater Plast*. 2016;53(3):394–8.
17. Qin L, Yao S, Zhao J, Zhou C, Oates TW, Weir MD, Wu J, Xu HHK. Review on Development and Dental Applications of Polyetheretherketone-Based Biomaterials and Restorations. *Materials (Basel)*. 2021 Jan 15;14(2):408. doi: 10.3390/ma14020408. PMID: 33467576; PMCID: PMC7830426.
18. Katsoulis J, Takeichi T, Sol Gaviria A, Peter L, Katsoulis K. Misfit of implant prostheses and its impact on clinical outcomes. Definition, assessment and a systematic review of the literature. *Eur J Oral Implantol*. 2017;10 Suppl 1:121–138. PMID: 28944373.
19. Torstrick FB, Lin ASP, Potter D, Safranski DL, Sulchek TA, Gall K, Guldborg RE. Porous PEEK Improves the Bone-Implant Interface Compared to Plasma-Sprayed Titanium Coating on PEEK. *Biomaterials* 2018, 185, 106–116.
20. Schwitalla A, Müller WD. PEEK dental implants: a review of the literature. *J Oral Implantol*. 2013 Dec; 39(6):743–9. doi: 10.1563/AAID-JOI-D-11-00002. Epub 2011 Sep 9. PMID: 21905892.
21. Paphanasiou, I, Kamposiora, P, Papavasiliou G. et al. The use of PEEK in digital prosthodontics: A narrative review. *BMC Oral Health* 20, 217 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12903-020-01202-7>.
22. Tetelman ED, Babbush CA. A new transitional abutment for immediate aesthetics and function. *Implant Dent*. 2008 Mar;17(1):51–8. doi: 10.1097/ID.0b013e318167648c. PMID: 18332758.
23. Poli PP, de Miranda FV, Polo TOB, Santiago Júnior JF, Lima Neto TJ, Rios BR, Assunção WG, Ervolino E, Maiorana C, Faverani LP. Titanium Allergy Caused by Dental Implants: A Systematic Literature Review and Case Report. *Materials (Basel)*. 2021 Sep 12;14(18):5239. doi: 10.3390/ma14185239. PMID: 34576463; PMCID: PMC8465040.
24. Müller K, Valentine-Thon E. Hypersensitivity to titanium: clinical and laboratory evidence. *Neuro Endocrinol Lett*. 2006 Dec;27 Suppl 1:31–5. Erratum in: *Neuro Endocrinol Lett*. 2007 Oct;28(5):iii. PMID: 17261997.

25. Sicilia A, Cuesta S, Coma G, Arregui I, Guisasola C, Ruiz E, Maestro A. Titanium allergy in dental implant patients: a clinical study on 1500 consecutive patients. *Clin Oral Implants Res.* 2008 Aug;19(8):823–35. doi: 10.1111/j.1600-0501.2008.01544.x. PMID: 18705814.
26. Maté Sánchez de Val J, Gómez-Moreno G, Pérez-Albacete Martínez C, Ramírez-Fernández M, Granero-Marín J, Gehrke S, et al. Peri-implant tissue behavior around non-titanium material: Experimental study in dogs. *Ann Anat* 2016; 206:104–9
27. Wiesli MG, Özcan M. High-Performance Polymers and Their Potential Application as Medical and Oral Implant Materials: A Review. *Implant Dent.* 2015 Aug;24(4):448–57. doi: 10.1097/ID.0000000000000285. PMID: 26035377.
28. Le Bars P, Bandiaky ON, Le Guéhennec L, Clouet R, Kouadio AA. Different Polymers for the Base of Removable Dentures? Part I: A Narrative Review of Mechanical and Physical Properties. *Polymers (Basel).* 2023 Aug 22;15(17):3495. doi: 10.3390/polym15173495. PMID: 37688123; PMCID: PMC10490543.
29. Zoidis P, Papatthanasiou I, Polyzois G. The Use of a Modified Poly-Ether-Ether-Ketone (PEEK) as an Alternative Framework Material for Removable Dental Prostheses. A Clinical Report. *J Prosthodont* 2016; 25:580–4.
30. Cao YZ, Wei HB, Wang J, Yu Z, Li DH. [Application of polyetheretherketone and its composite as frameworks in fixed dental prostheses]. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi.* 2019 Nov 9;54(11):773–777. Chinese. doi: 10.3760/cma.j.issn.1002-0098.2019.11.010. PMID: 31683386.
31. Stawarczyk B, Beuer F, Wimmer T, Jahn D, Sener B, Roos M, et al. Polyetheretherketone—a suitable material for fixed dental prostheses? *J Biomed Mater Res Part B: Appl Biomater* 2013; 101:1209–16.
32. Zoidis P, Bakiri E, Polyzois G. Using modified polyetheretherketone (PEEK) as an alternative material for endocrown restorations: A short-term clinical report. *J Prosthet Dent* 2017; 117:335–9.
33. Wagner C, Stock V, Merk S, Schmidlin P, Roos M, Eichberger M, et al. Retention load of telescopic crowns with different taper angles between cobalt-chromium and polyetheretherketone made with three different manufacturing processes examined by pull-off test. *J Prosthodont* 2018; 27:162–8.
34. [34] Uhrenbacher J, Schmidlin P, Keul C, Eichberger Roos M, Gernet W, et al. The effect of surface modification on the retention strength of polyetheretherketone crowns adhesively bonded to dentin abutments. *J Prosthet Dent* 2014; 112:1489–97.
35. Seferis JC. (1986). Polyetheretherketone (PEEK): Processing-structure and properties studies for a matrix in high performance composites, 7(3), 158–169. doi:10.1002/pc.750070305.
36. Schwitala AD, Spintig T, Kallage I, Müller WD, Flexural behavior of PEEK materials for dental application, *Dental Materials*, Volume 31, Issue 11, 2015, Pages 1377–1384, ISSN 0109-5641, <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.08.151>.
37. Santing HJ, Meijer HJ, Raghoobar GM, Özcan M. Fracture strength and failure mode of maxillary implant-supported provisional single crowns: a comparison of composite resin crowns fabricated directly over PEEK abutments and solid titanium abutments. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2012 Dec;14(6):882–9. doi: 10.1111/j.1708-8208.2010.00322.x. Epub 2010 Dec 22. PMID: 21176099.
38. Paglia M, Beretta M, Quinzì V, Colombo S. PEEK polymer in orthodontics: a scoping review. *Eur J Paediatr Dent.* 2022 Jun;23(2):137–139. doi: 10.23804/ejpd.2022.23.02.10. PMID: 35722844.
39. Rofaida AA, Khaled AS, Ragia M. Clinical assessment of Open Reduction Internal Fixation (ORIF) of Mandibular Body Fractures Using Computer Assisted Polyetherether Ketone (PEEK) Custom Made Plates Versus Conventional Titanium Plates: A Randomized Clinical Trial. (2021). *Indian Journal of Public Health Research & Development*, 12(2), 22–326. <https://doi.org/10.37506/ijphrd.v12i2.14139>.
40. Brown SA, Hastings RS, Mason JJ, Moet A. Characterization of short-fibre reinforced thermoplastics for fracture fixation devices. *Biomaterials.* 1990 Oct;11(8):541–7. doi: 10.1016/0142-9612(90)90075-2. PMID: 2149076.
41. Nourhan M, Abdelmoneim, Mahitab M. Soliman, Marwa G. Noureldin, Omneya A. Gamaleldin, Treatment of pediatric mandibular fractures using customized computer assisted PEEK plates, 2022, *Alexandria Dental Journal* 47(3):177–184 DOI:10.21608/adjalexu.2022.145417.1289.
42. Thomas P, Bandl WD, Maier S, Summer B, Przybilla B. Hypersensitivity to titanium osteosynthesis with impaired fracture healing, eczema, and T-cell hyperresponsiveness in vitro: case report and review of the literature. *Contact Dermatitis.* 2006 Oct;55(4):199–202. doi: 10.1111/j.1600-0536.2006.00931.x. PMID: 16958916.
43. Järvinen S, Suojanen J, Kormi E, Wilkman T, Kiukkonen A, Leikola J, Stoor P. The use of patient specific polyetheretherketone implants for reconstruction of maxillofacial deformities. *J Craniomaxillofac Surg.* 2019 Jul;47(7):1072–1076. doi: 10.1016/j.jcms.2019.03.018. Epub 2019 Apr 24. PMID: 31103433.
44. Arcas A, Vendrell G, Cuesta F, Bermejo L, Piqué N (2020) Mandibular Angle Augmentation using Customized PEEK Implants and Guides Generated with 3D Planning and Printing: Case Studies. *Ann Case Report* 14: 511. DOI: 10.29011/2574-7754.100511
45. Deng L, Deng Y, Xie K. AgNPs-decorated 3D printed PEEK implant for infection control and bone repair. *Colloids Surf B Biointerfaces.* 2017 Dec 1; 160:483–492. doi: 10.1016/j.colsurfb.2017.09.061. Epub 2017 Oct 2. PMID: 28992487.
46. Genovesi W, Comenale IC, Genovesi FW, Veloso Fernandes M. Biomechanical comparative analysis of temporomandibular joint, glenoid fossa and head of the condyle of conventional models prosthesis with new PEEK design. *J. Oral. Biol. Craniofac Res.* 2022; 12:529–541. doi: 10.1016/j.jobcr.2022.06.006.
47. Elledge R, Mercuri LG, Attard A, Green J, Speculand B. Review of emerging temporomandibular joint total joint replacement systems. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2019 Oct;57(8):722–728. doi: 10.1016/j.bjoms.2019.08.009. Epub 2019 Aug 25. PMID: 31455594.
48. Todaro M, Saponaro G, Perquati F, Gasparini G, Signorelli F, Tartaglione T, Moro A. Bone Regeneration and Polyetheretherketone Implants in Maxillo-Facial Surgery and Neurosurgery: A Multidisciplinary Study. *Biology (Basel).* 2024 Jun 25;13(7):467. doi: 10.3390/biology13070467. PMID: 39056662; PMCID: PMC11273635.
49. Kim MM, Boahene KD, Byrne PJ. Use of customized polyetheretherketone (PEEK) implants in the reconstruction of complex maxillofacial defects. *Arch. Facial Plast. Surg.* 2009; 11:53–57. doi: 10.1001/archfaci.11.1.53.
50. Jalbert F, Boetto S, Nadon F, Lauwers F, Schmidt E, Lopez R. One-step primary reconstruction for complex craniofacial resection with PEEK custom-made implants. *J Craniomaxillofac Surg.* 2014 Mar;42(2):141–8. doi: 10.1016/j.jcms.2013.04.001. Epub 2013 May 18. PMID: 23688592.
51. Racine C, Raffoul W, Martinez A, Broome M. Reconstruction fronto-orbitaire complexe avec prothèse en PEEK et expansion cutanée: à propos d'un cas [Complex fronto-orbital reconstruction with a PEEK prosthesis and skin expansion: about a case]. *Rev Stomatol Chir Maxillofac.* 2012 Dec;113(6):461–4. French. doi: 10.1016/j.stomax.2012.05.005. Epub 2012 Nov 22. PMID: 23182692.

52. Goodson ML, Farr D, Keith D, Banks RJ. Use of two-piece polyetheretherketone (PEEK) implants in orbitozygomatic reconstruction. *The British Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*. 2012 Apr;50(3):268–269. DOI: 10.1016/j.bjoms.2011.04.077. PMID: 21700371.
53. Li Y, Li Z, Tian L, Li D, Lu B, Shi C, Niu Q, Liu F, Kong L, Zhang J. Clinical application of 3D-printed PEEK implants for repairing mandibular defects, *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, Volume 50, Issue 8, 2022, Pages 621–626, ISSN 1010-5182, <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2022.06.002>.
54. Berrone M, Aldiano C, Pentenero M, Berrone S. Correction of a mandibular asymmetry after fibula reconstruction using a custom-made polyetheretherketone (PEEK) onlay after implant supported occlusal rehabilitation. *Acta Otorhinolaryngol Ital*. (2015) 35:285–8. PMID: 26824216.
55. Suresh V, Anolik R, Powers D. The Utility of Polyether-Ether-Ketone Implants Adjacent to Sinus Cavities After Craniofacial Trauma. *J Oral Maxillofac Surg*. 2018 Nov;76(11):2361–2369. doi: 10.1016/j.joms.2018.05.002. Epub 2018 May 10. PMID: 29852139.
56. Lommen J, Schorn L, Sproll C, Hausmann J, Kübler NR, Budach W, Rana M, Tamaskovics B. Reduction of CT Artifacts Using Polyetheretherketone (PEEK), Polyetherketoneketone (PEKK), Polyphenylsulfone (PPSU), and Polyethylene (PE) Reconstruction Plates in Oral Oncology. *J Oral Maxillofac Surg*. 2022 Jul;80(7):1272–1283. doi: 10.1016/j.joms.2022.03.004. Epub 2022 Mar 10. PMID: 35378095.
57. Kerkfeld V, Schorn L, Depprich R, Lommen J, Wilkat M, Kübler N, Rana M, Meyer U. Simultaneous PSI-Based Orthognathic and PEEK Bone Augmentation Surgery Leads to Improved Symmetric Facial Appearance in Craniofacial Malformations. *J Pers Med*. 2022 Oct 5;12(10):1653. doi: 10.3390/jpm12101653. PMID: 36294792; PMCID: PMC9605459.
58. Peñarrocha-Diogo M; Bernabeu-Mira JC; Fernández-Ruiz A; Aparicio C; Peñarrocha-Oltra D. Bone Regeneration and Soft Tissue Enhancement Around Zygomatic Implants: Retrospective Case Series. *Materials* 2020, 13, 1577. <https://doi.org/10.3390/ma13071577>
59. Murnan EJ, Christensen BJ. Risk Factors for Postoperative Inflammatory Complications After Maxillofacial Reconstruction Using Polyether-Ether-Ketone Implants. *J Oral Maxillofac Surg*. 2021 Mar;79(3): 696.e1–696.e7. doi: 10.1016/j.joms.2020.09.039. Epub 2020 Oct 5. PMID: 33121947.
60. Yao S, Zhang Q, Mai Y, Yang H, Li Y, Zhang M, Zhang R. Outcome and risk factors of complications after cranioplasty with polyetheretherketone and titanium mesh: A single-center retrospective study. *Front Neurol*. 2022 Sep 21; 13:926436. doi: 10.3389/fneur.2022.926436. PMID: 36212642; PMCID: PMC9533107.
61. Morselli C, Zaed I, Tropeano MP, Cataletti G, Iaccarino C, Rossini Z, Servadei F. Comparison between the different types of heterologous materials used in cranioplasty: a systematic review of the literature. *J Neurosurg Sci*. 2019 Dec;63(6):723–736. doi: 10.23736/S0390-5616.19.04779-9. Epub 2019 Oct 7. PMID: 31599560.
62. Ma R, Weng L, Bao X, Song S, Zhang Y. In vivo biocompatibility and bioactivity of in situ synthesized hydroxyapatite/polyetheretherketone composite materials. *J Appl Polym Sci*. 2013; 127:2581–2587. doi: 10.1002/app.37926.
63. Ma R, Guo D. Evaluating the bioactivity of a hydroxyapatite-incorporated polyetheretherketone biocomposite. *J Orthop Surg Res*. 2019 Jan 25;14(1):32. doi: 10.1186/s13018-019-1069-1. PMID: 30683125; PMCID: PMC6347847.
64. Kjellin P, Vikingsson L, Danielsson K, Johansson P, Wennerberg A. A nanosized zirconium phosphate coating for peek implants and its effect in vivo. *Materialia*. 2020; 10:100645.
65. Shimizu T, Fujibayashi S, Yamaguchi S, Yamamoto K, Otsuki B, Takemoto M, Tsukanaka M, Kizuki T, Matsushita T, Kokubo T, Matsuda S. Bioactivity of sol-gel-derived TiO₂ coating on polyetheretherketone: In vitro and in vivo studies. *Acta Biomater*. 2016 Apr 15; 35:305–17. doi: 10.1016/j.actbio.2016.02.007. Epub 2016 Feb 6. PMID: 26861855.
66. Costa-Palau S, Torrents-Nicolas J, Brufau-de Barberà M, Cabratosa-Termes J. Use of polyetheretherketone in the fabrication of a maxillary obturator prosthesis: a clinical report. *J Prosthet Dent*. 2014 Sep;112(3):680–2. doi: 10.1016/j.prosdent.2013.10.026. Epub 2014 Mar 11. PMID: 24630397.
67. Villefort RF, Tribst JPM, Dal Piva AMO, Borges AL, Binda NC, Ferreira CEA, Bottino MA, von Zeidler SLV. Stress distribution on different bar materials in implant-retained palatal obturator. *PLoS One*. 2020 Oct 30;15(10):e0241589. doi: 10.1371/journal.pone.0241589. PMID: 33125441; PMCID: PMC7598468.
68. Groover M, Zimmers E. CAD/CAM: computer-aided design and manufacturing. — Pearson Education, 1983.
69. Oh Jh. Recent advances in the reconstruction of cranio-maxillofacial defects using computer-aided design/computer-aided manufacturing. *Maxillofac Plast Reconstr Surg* 40, 2 (2018). <https://doi.org/10.1186/s40902-018-0141-9>.
70. Arcas A, Vendrell G, Cuesta F, Bermejo L, Piqué N. (2020). Mandibular Angle Augmentation using Customized PEEK Implants and Guides Generated with 3D Planning and Printing: Case Studies. *Annals of Case Reports*.
71. Patel N, Kim B, Zaid W. Use of Virtual Surgical Planning for Simultaneous Maxillofacial Osteotomies and Custom Polyetheretherketone Implant in Secondary Orbito-Frontal Reconstruction: Importance of Restoring Orbital Volume. *J Craniofac Surg*. 2017 Mar;28(2):387–390. doi: 10.1097/SCS.0000000000003313. PMID: 28027185.
72. Van de Vijfeijken SECM, Schreurs R, Dubois L, Becking AG; CranioSafe Group. The use of cranial resection templates with 3D virtual planning and PEEK patient-specific implants: A 3 year follow-up. *J Craniomaxillofac Surg*. 2019 Apr;47(4):542–547. doi: 10.1016/j.jcms.2018.07.012. Epub 2018 Jul 25. PMID: 30745010.
73. Ajami S, Coathup MJ, Khoury J, Blunn GW. Augmenting the bioactivity of polyetheretherketone using a novel accelerated neutral atom beam technique. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2017 Aug;105(6):1438–1446. doi: 10.1002/jbm.b.33681. Epub 2016 Apr 18. PMID: 27086858.
74. Oladapo BI, Zahedi SA, Ismail SO, Omigbodun FT. 3D printing of PEEK and its composite to increase biointerfaces as a biomedical material— A review. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2021 Jul; 203:111726. doi: 10.1016/j.colsurfb.2021.111726. Epub 2021 Mar 26. PMID: 33865088.
75. Liu X, Han F, Zhao P, Lin C, Wen X, Ye X. Layer-by-layer self-assembled multilayers on PEEK implants improve osseointegration in an osteoporosis rabbit model. *Nanomedicine*. 2017 May;13(4):1423–1433. doi: 10.1016/j.nano.2017.01.011. Epub 2017 Jan 25. PMID: 28131883.
76. Bai Z, Zhao Y, Cui C, Yan J, Qin D, Tong J, Peng H, Liu Y, Sun L, Wu X, Li B, Li X. Multifaceted Materials for Enhanced Osteogenesis and Antimicrobial Properties on Bioplastic Polyetheretherketone Surfaces: A Review. *ACS Omega*. 2024 Apr 12;9(16):17784–17807. doi: 10.1021/acsomega.4c00923. PMID: 38680314; PMCID: PMC11044237.

© Мустафаева Софият Магометовна (666238@mail.ru); Мустафаев Магомет Шабазович (musmag@mail.ru);
 Мустафаева Фаризат Магометовна (farident@mail.ru); Габуев Ильяс Керамович (ilias07-07@mail.ru);
 Вороков Астемир Асланович (assvorokov15@gmail.com); Дышекова Фатима Хасановна (f.dysheкова@bk.ru)
 Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»