

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 54.04

DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_10_28

Д. А. Лутова, М. С. Лисаневич, А. А. Никифоров,
И. Н. Мусин, И. В. Волков, Р. А. Ахмедьянова

**ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФОН: ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ В МЕДИЦИНСКИХ ИЗДЕЛИЯХ
(ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)**

Ключевые слова: полифениленсульфон, производство, полиарилены, суперконструкционные пластики, растворители, медицина, аддитивное производство, 3D-печать, композиционные материалы.

Суперконструкционные пластики имеют большой потенциал для применения в медицине для улучшения качества медицинских изделий, развития современной медицинской техники и оборудования, активно заменяя собой металлы. Суперконструкционные пластики имеют лучшие механические, термические и технологические характеристики в отличие от других типов материалов. В статье рассмотрен такой суперконструкционный пластик, который активно исследуется и разрабатывается для медицины, как полифениленсульфон. Полифениленсульфон (PPSU) относится к группе термостойких полиариленов, сохраняющих работоспособность при температурах от -100 до $+250$ °С. Он обладает уникальными свойствами по сравнению с другими материалами. Полифениленсульфон является аморфным, термостойким термопластиком, отличается улучшенными прочностными и гидролитическими характеристиками, стойкостью к рентгеновскому и гамма-излучению, а также устойчив в условиях стерилизации и может выдерживать до 1000 циклов стерилизации. Полифениленсульфон востребован в различных областях медицины (хирургия, стоматология и так далее). Из него изготавливается множество приспособлений для медицины. Этот полимер используется в качестве прозрачной части анестезиологических масок, корпусов фармацевтических фильтров благодаря прочности и нетоксичности. Физиологическая инертность делает его пригодным для изготовления протезов, внедряемых в тело человека. Также из полифениленсульфона производят эндоскопические наконечники, медицинские палочки для проб, муфты для переливания жидкостей, фитинги, головки для медицинских инструментов, крышки, поддоны для стерилизации, а также лабораторное оборудование. Полифениленсульфон используется для деталей искусственного сердца, в качестве стандартных имплантатов для контурной пластики, в челюстно-лицевой хирургии для морфогенеза тканей при протезировании зубов; в качестве материала мембран диализаторов. В настоящее время потребности в полифениленсульфоне обеспечиваются по импорту. В России технологии производства полифениленсульфона находится на стадии разработки на исследовательском уровне. Поэтому одним из наиболее востребованных и перспективных направлений развития суперконструкционных пластиков является разработка инновационных технологий производства, исследование и расширение областей применения полифениленсульфона в медицине.

D. A. Lutova, M. S. Lisanevich, A. A. Nikiforov,
I. N. Musin, I. V. Volkov, R. A. Akhmedyanova

POLYPHENYLENE SULFONE: PRODUCTION AND APPLICATION IN MEDICAL DEVICES (REVIEW)

Keywords: polyphenylene sulfone, production, obtaining, properties, polyarylenes, superstructural plastics, solvents, medicine additive manufacturing, 3D printing, composite materials.

Superstructural plastics have great potential for use in medicine to improve the quality of medical products, develop modern medical technology and equipment, actively replacing metals. Superstructural plastics have better mechanical, thermal and technological characteristics compared to other types of materials. The article discusses such a superstructural plastic, which is actively researched and developed for medicine, as polyphenylene sulfone. Polyphenylene sulfone (PPSU) belongs to the group of heat-resistant polyarylenes that remain functional at temperatures from -100 to $+250$ °C. It has unique properties compared to other materials. Polyphenylene sulfone (PPSU) is an amorphous, heat-resistant thermoplastic, has improved strength and hydrolytic characteristics, resistance to X-ray and gamma radiation, and is also resistant to sterilization and can withstand up to 1000 sterilization cycles. Polyphenylene sulfone is in demand in various fields of medicine (surgery, dentistry, etc.). It is used to manufacture many medical devices. Polyphenylene sulfone is used as a transparent part of anesthetic masks, pharmaceutical filter housings due to its strength and non-toxicity. Physiological inertness makes it suitable for the manufacture of prostheses implanted in the human body. Polyphenylene sulfone is also used to produce endoscopic tips, medical sample sticks, fluid transfer couplings, fittings, medical instrument heads, lids, sterilization trays, and laboratory equipment. Polyphenylene sulfone is used for artificial heart parts, as standard implants for contour plastics, in maxillofacial surgery for tissue morphogenesis in dental prosthetics; as a dialyzer membrane material. The processing of polyphenylene sulfone for the production of medical devices is also being studied. In Russia polyphenylene sulfone is at the development stage and at the research level. Therefore, the study and research of polyphenylene sulfone for medicine is a promising direction.

Введение

В настоящее время уровень производства основных конструкционных материалов на душу населе-

ния в России незначительно отличается от среднемировых значений, но по уровню их использования Россия уступает показателям стран-лидеров. На прогноз-

ный период важнейшая задача заключается в повышении эффективности использования материалов, в том числе активно импортируемых в страну. На основе данных о внешнеторговых поставках, выпуск и производство конструкционных пластиков нужно увеличить в 1,8 раза.

Расширенное вовлечение в производство материалов, в краткосрочной перспективе (до 2024-2025 гг.) предусматривается в рамках национальных проектов и федеральных программ. Обществу для осуществления социального развития от предприятий требуется доступные материалы, а бизнесу прибыль. Следовательно, спрос на полимерные композиционные материалы, как у общества, так и предприятий растет [1].

Таким образом, актуальной задачей становится исследование и разработка полимерных композиционных материалов. В России для производства изделий медицинского назначения активно разрабатываются и используются новые виды полимерных материалов. Это способствует повышению качества медицинских изделий, потому что полимерные материалы обладают рядом преимуществ по сравнению с металлами. Например, основной проблемой, с которой сталкиваются люди при использовании протезов из металлов является неравномерное распределение нагрузки. Это связано с тем, что металлы являются достаточно твердыми материалами, и после установки импланта физиологическая нагрузка передается на медицинское изделие. Это приводит к ослаблению кости с течением времени и снижению плотности ткани, в которую установлен протез. Происходит потеря костной ткани вокруг имплантата, что в конечном итоге приводит к расшатыванию имплантата. Возникает необходимость повторной операции. Также проблемой металлических имплантов является такое заболевание как металлоз. Это заболевание характеризуется выбросом металлических продуктов износа в ткани и кровь. Металлоз одновременно приводит к прямому цитотоксическому эффекту и воспалительной реакции в тканях и в последующем к отказу имплантата. Металлоз типичен для суставных протезов, где движение тела вызывает трение между компонентами имплантата [2].

Использование конструкционных материалов позволяет увеличивать производительность и срок службы оборудования, повышать рентабельность производства. Поэтому одним из новых направлений отечественной науки и медицины является исследование таких полимерных материалов, как суперконструкционные пластики, называемых также термостойкими пластиками. В медицинских изделиях используют следующие суперконструкционные пластики: полиэфиримид (PEI), полисульфон (PSU), полиэфирсульфон (PES), полифениленсульфон (PPSU), полиэфирэфиркетон (PEEK), полифениленсульфид (PPS) [3,4].

Данная статья посвящена такому полимерному композиционному материалу, как полифениленсульфон.

Синтез полифениленсульфона

Полифениленсульфон (PPSU) относится к группе термостойких полиариленов, сохраняющих работоспособность при температурах от -100 до $+250$ °С. К

группе полиариленов также относятся полисульфон (PSU) и полиэфирсульфон (PES). Все они содержат арильные группы, которые связаны сульфо- ($-\text{SO}_2-$) и эфирными группами ($-\text{O}-$). На рисунке 1 представлена структурная формула и схема реакции синтеза полифениленсульфона. Его получают конденсацией 4,4'-дихлордифенилсульфона с 4,4'-дигидроксифенилом.

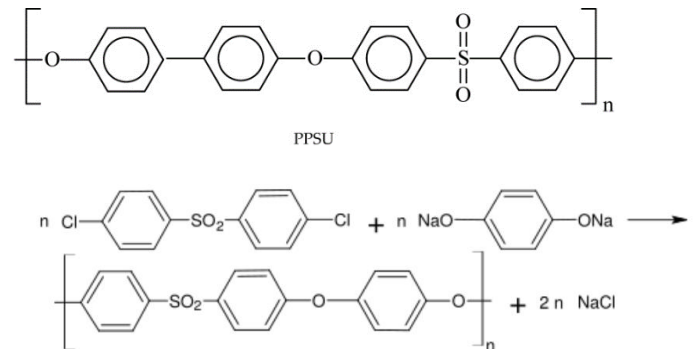


Рис. 1 – Структурная формула и схема реакции получения полифениленсульфона [5]

Fig. 1 – Structural formula and reaction scheme for the preparation of polyphenylene sulfone [5]

Свойства полифениленсульфона

Полифениленсульфон (PPSU) является аморфным, термостойким термопластиком. Полимер известен своей высокой прочностью на изгиб и растяжение, превосходной гидролитической стабильностью и хорошей устойчивостью к химикатам и теплу. Отличается стойкостью к гамма- и рентгеновскому излучению. Полифениленсульфон не поддерживает горение и хорошо поддается механической обработке, а также термоформованию. Он хорошо склеивается и сваривается.

Существует ряд зарубежных работ, посвященных исследованию свойств полифениленсульфона.

В работе [6] было определено влияние соотношения мономеров и типа растворителя на молекулярную массу, химическую структуру, механические, термические и реологические характеристики полифениленсульфона. Для изучения влияния растворителей на свойства получаемого полифениленсульфона синтеза проводили в таких диполярных растворителях, как N-метилпирролидон (N-МП), диметилсульфоксид и N,N-диметилацетамид. По данным ИК-спектроскопии полимеры, синтезированные в разных растворителях, имеют одинаковую химическую структуру. Образцы, синтезированные в ДМСО и в N-МП после формования оказались потемневшими [6].

Одной из важнейших характеристик, предопределяющих возможность изготовления изделий из полифениленсульфона методом литья под давлением, является показатель текучести расплава полимера, который напрямую зависит от молекулярной массы (Mw). Поэтому основные промышленные марки полифениленсульфона (Ultrason® P фирмы BASF и Radel R фирмы Solvay) имеют фиксированное значение текучести расплава оптимальное для перера-

ботки методом литья под давлением. Образец, синтезированный в растворителе диметилсульфоксиде имеет существенно более низкие значения текучести расплава (таблица 1) по сравнению с полимерами, синтезированными в N-метилпирролидоне и N,N-диметилацетамиде. Причины этого явления связаны с химическими процессами, протекающими при температуре обработки до 350 °С [6].

Таблица 1 – Показатели текучести расплава полифениленсульфона, синтезированного в разных растворителях [6]

Table 1 – Melt flow properties of polyphenylene sulfone synthesised in different solvents [6]

Растворитель	Показатель текучести расплава, (г/мин)	
	5 мин	20 мин
N-метилпирролидон	23,0	23,4
N,N-диметилацетамид	20,2	20,0
Диметилсульфоксид	4,0	1,1

При 300–425 °С происходит присоединение концевых фенокси групп полиэфирсульфонов к фенольным фрагментам полимерной цепи, что приводит к отщеплению атома водорода от фенольного кольца, облегчая его сшивание (рис. 2).

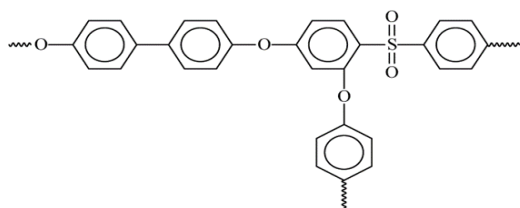


Рис. 2 – Структура ПФС, сшитого при повышенных температурах [6]

Fig. 2 – Structure of polyphenylene sulfone cross-linked at elevated temperatures [6]

Исследовано также влияние молекулярной массы полимера на его пригодность к переработке и механические свойства образцов [6]. Были синтезированы полимеры различных молекулярных масс и установлено, что с уменьшением молекулярной массы увеличивается хрупкость материала. При этом ударная вязкость и относительное удлинение при разрыве уменьшаются. С увеличением количества избыточного мономера, приводящего к уменьшению молекулярной массы, растет модуль упругости. Описанные в работе полимеры по модулю упругости соответствуют коммерческому аналогу Ultrason-P и превосходят его по пределу прочности и относительному удлинению при разрыве. Существует достаточно узкий диапазон молекулярных масс полифениленсульфона $40\text{--}60 \times 10^3$ (г/моль), в котором полимер пригоден для переработки методом экструзии [6].

В исследовании [7] было проведено изучение объемной температуропроводности и теплопроводности полифениленсульфона и полифениленсульфида с помощью прибора Hot Disc Transient Plane Source (TPS) 2500 S. Стоит отметить, что значения практически

сопоставимы с точностью до 5 %. У полифениленсульфона объемная теплопроводность 0,3097 Вт/м•К, температуропроводность – 0,2043 мм²/с, стандартное отклонение – 0,006142. У полифениленсульфида объемная теплопроводность – 0,2989 Вт/м•К, температуропроводность – 0,1928, стандартное отклонение – 0,005492 [7].

Производство полифениленсульфонов

Многие виды полимеров инженерного назначения в России производятся на небольших опытных и опытно-промышленных установках, и потребность в таких полимерах удовлетворяется за счет импорта.

МИЦ «Композиты России» разработаны отечественные малоотходные технологии синтеза полисульфона и полиэфирсульфона [8].

В настоящее время мировое производство полисульфона составляет 55 тысяч тонн в год.

Торговые марки (изготовители) полифениленсульфона Acudel (Solvay Advanced Polymers), Radel R (Solvay Advanced Polymers). Лидерами по производству полифениленсульфона являются фирмы Solvay, BASF, японская Sumitomo Chemical и китайские Youju New Materials, Shandong Special Plastics, JDA Degussa и Shandong Jinlan Special Plastics [8].

В США единственным производителем сульфоновых полимеров является фирма Амоко Корп. Полисульфон выпускает под маркой Udel, полиэфирсульфон и полифенилсульфон - Radel A и Radel R. Производство сульфоновых полимеров в США на 2009г. составило для полисульфона 36,6 тыс. тонн, для полифениленсульфона и полиэфирсульфона 11,2 тыс. тонн. В Западной Европе единственным производителем сульфоновых полимеров является фирма BASF, которая выпускает полисульфон и полиэфирсульфон под марками Ultrason S и Ultrason E. Общие объемы производства сульфоновых полимеров в Западной Европе на 2010г. составили 8,7 тыс. тонн.

Распределение по областям потребления полисульфонов следующее: электроника / электротехника — 50%, транспорт — 23%, медицина — 12%, космос/авиация — 7%, другие — 8% [9].

Мировой рынок сульфоновых полимеров 1,8 млрд долларов США в 2023 году и, как ожидается, достигнет 2,6 млрд долларов США к 2032 году при среднегодовом темпе роста 6,1% в прогнозируемый период 2023–2032 годов [10,11].

Региональный анализ рынка полифениленсульфона показывает различную степень спроса и внедрения в разных частях мира. В Северной Америке рынок полифениленсульфоновых смол обусловлен наличием зрелого промышленного сектора, который ценит высокопроизводительные термопластики для применения в аэрокосмической, автомобильной и медицинской промышленности. Переходя к Европе, рынок полифениленсульфонов характеризуется сильным акцентом на инновации и исследования, особенно в таких странах, как Германия и Франция [12].

Характеристики полифениленсульфона Ultrason®P (немецкой компании BASF) различных марок приведены в таблице 2 [13].

Таблица 2 – Характеристики полифениленсульфона разных марок Ultrason®P**Table 2 – Characteristics of different grades of Ultrason®P polyphenylene sulphone**

Марка	Плотность, г/см ³	Температура изгиба под нагрузкой 0,45 МПа	Примечание
Ultrason E1010	1,37	216°C	Высокая текучесть, легко отливается
Ultrason E2010	1,37	218°C	Средняя вязкость, литьевая марка
Ultrason S2010	1,24	181°C	Литьевая марка
Ultrason P3010	1,29	196°C	Заменяет металлические фитинги для труб, марка для литья и экструзии

Применение полифениленсульфонов

Полифениленсульфон представляет большой интерес для различных отраслей промышленности благодаря своему особому набору ценных свойств, таких как термостойкость, огнестойкость, хорошие механические и диэлектрические свойства, химическая и радиационная стойкость и т. д. Полифениленсульфон широко используется в автомобильной, медицинской, электротехнической, авиационной промышленности и в 3D-печати.

По сравнению с металлами у суперконструкционных пластиков для производства медицинских инструментов есть ряд преимуществ: низкая плотность, стойкость к коррозии, стойкость к воздействию агрессивных сред, термо- и электроизолирующие свойства, биологическая нейтральность.

Полифениленсульфон в медицине

Направления применения в медицине полифениленсульфона обширны. Его используют для изготовления стерилизуемых футляров и лотков, ручек хирургических, одонтологических инструментов и других медицинских и стоматологических приспособлений и приборов. Физиологическая инертность делает его пригодным для изготовления протезов, внедряемых в тело человека. Также из полифениленсульфона производят эндоскопические наконечники, медицинские палочки для проб, муфты для переливания жидкостей, соединения (фитинги), головки для медицинских инструментов, крышки, поддоны для стерилизации, а также лабораторное оборудование. Из него изготавливаются различные детали оборудования для процессов стерилизации гамма- или рентгеновскими лучами, газообразным этиленоксидом, горячим воздухом или перегретым паром [5].

Полифениленсульфон используются для деталей искусственного сердца, в качестве стандартных имплантатов для контурной пластики, в челюстно-лицевой хирургии для морфогенеза тканей при протезировании зубов; в качестве материала мембран диализаторов [14].

В работе [14] описана композиция, которая состоит из полисульфона (марка ПС-Н ТУ 6-05-1969-84) – 87,5 %, фторопласта – 11,5 %, оксида титана – 1,0 %, для применения в качестве импланта. По твердости искусственные зубы, изготовленные на основе этой композиции, превосходят изготовленные из полиметилметакрилата в 1,5 раза, более устойчивы к истиранию, долговечны и светостабильны. В ходе исследования на крысах не выявлено специфических морфологических, биохимических, гематологических признаков, свидетельствующих о токсическом влиянии предложенной композиции на организм животных.

В работе [15] описано применение всех представителей полисульфонов - полифениленсульфона, полиэфирсульфона, полисульфона – для изготовления медицинских инструментов.

На сегодняшний день активно развивается аддитивное производство – процесс послойного создания объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели. В медицине аддитивное производство предоставляет большие возможности в создании протезов различных форм, конфигураций и назначения, печати макетов органов и тканей, создания моделей опухолей разной этиологии в целях поэтапного планирования хирургического вмешательства. Суперконструкционные пластики (полифениленсульфоны) активно изучаются и внедряются и для использования в аддитивных технологиях для изготовления изделий медицинского назначения [16,17,18,19].

Например, работы [20,21] посвящены разработке угле- и стеклонаполненных композиционных материалов для 3 D печати. Установлено, что свойства композитов с углеродными волокнами значительно превосходят свойства композитов со стеклянными волокнами. Показано, что введение волокнистых наполнителей приводит к повышению теплостойкости полифениленсульфона. Наиболее высокие значения демонстрируют композиты с содержанием углеродных волокон с большей длиной, что связано с их более высоким модулем упругости. Введение в рецептуру композита олигофениленсульфона оказывает эффективное пластифицирующее действие. Напечатанные методом послойного нанесения расплавленной полимерной нити образцы из непластифицированных волокнонаполненных композитов полифениленсульфона имеют низкие механические свойства, что связано с высокой пористостью. Напечатанные образцы обладают хорошим межрастровым сцеплением и как результат высокими физико-механическими свойствами (~ в 2 раза увеличивается модуль упругости и ~ в 4,5 раза прочность).

Применение полифениленсульфона в аддитивных технологиях рассмотрено в работах [22, 23,24].

В мире известна всего одна марка полифениленсульфона, пригодная для 3D-печати - PPSU фирмы

Stratasys (США). Работа [25] посвящена разработке композиционных материалов на основе полифениленсульфона для 3 D печати и использованию полифениленсульфона в аддитивном производстве. Проведено сравнительное исследование влияния наполнителей – мела, талька, графита, углеродного волокна (УВ) на свойства полифениленсульфона. Показано, что наиболее эффективными наполнителями являются тальк и углеродные волокна. Так, при 15%-ом содержании талька модуль упругости при изгибе композита превосходит соответствующее значение исходного PPSU на 62 %, модуль упругости при растяжении на 61 %, предел прочности при растяжении на 44 %. При введении 10 % УВ модуль упругости при изгибе возрастает в среднем на 100 %, а прочность при разрыве – на 40 %.

Исследована эффективность использования ударопрочного полистирола и поликарбоната в качестве модификаторов ударной вязкости полифениленсульфона. Выявлено, что наиболее высоким показателем ударной вязкости обладают полимер-полимерные композиты полифениленсульфона с поликарбонатом. Введение талька повышает огнестойкость полифениленсульфона. Установлено, что 3D-изделия из разработанных композитов не уступают по свойствам литьевым. Экспериментальные образцы композитного полифениленсульфона успешно прошли апробацию для 3D-печати крупногабаритных сложных тонкостенных изделий.

В работе «Исследование термических свойств суперконструкционных термопластов в аддитивных технологиях» [26] изучены физико-механические свойства полифениленсульфона, а также проведена апробация синтезированных полифениленсульфонов в 3D-печати методом FDM и установлено, что полифениленсульфон с вязкостью 04-0,5 дЛ/г обладает оптимальными характеристиками для 3D-печати.

Также данное направление активно исследуется в работе «3D-печать изделий из композиционных материалов на основе высокотемпературных термопластичных матриц» [26-28].

В статье [29] «Исследование упруго-деформационных характеристик мононитей из суперконструкционных полимеров» делают выводы о том, что выбор вида нитей и подбор матрицы позволят получить композиционный материал с уникальными, но прогнозируемыми механическими свойствами. В связи с этим перспективной представляется возможность изготовления сложных конструкций из суперконструкционных полимеров методами ткачества или плетения полифениленсульфона и полиэфирэфиркетона, которые являются востребованными в медицине и являются альтернативой сетчатым титановым цилиндрическим имплантам позвонков.

В зарубежных странах выпускают медицинские изделия из полифениленсульфона. Например, полифениленсульфон Radel polyphenylsulfone (PPSU) был выбран для использования в импеллере высокого давления для аппаратов искусственной вентиляции легких и аппаратов постоянного положительного давления в дыхательных путях (CPAP), разработанном MUS International, ведущим китайским производителем высокопроизводительных миниатюрных

вентиляторов. Материал был выбран из-за его высоких показателей прочности, ударной вязкости и стойкости к растрескиванию под напряжением, а также биосовместимости [30].

Полифениленсульфон также исследуется зарубежными учеными в качестве альтернативы стеклу и металлам благодаря инертности и долговечности [31].

Контроль качества является обязательным требованием для производства пластика для здравоохранения. Для производства и разработки пластика для здравоохранения требуются регистрация FDA и сертификация ISO 13485.

Для паровой стерилизации многоразовых медицинских устройств требуются материалы, устойчивые к деградации под воздействием воды при температурах от 250 F до 273 F в течение 15–30 минут. Полифениленсульфон является одним из таких материалов. Полифениленсульфон Ultrason® компании BASF используются в качестве прозрачной части анестезиологических масок, корпусов фармацевтических фильтров, фильтрующих картриджей для диализа в почечной терапии, имплантируемых катетерных портов, используемых для венозного доступа в онкологии, крышек для лотков хирургических инструментов, стоматологических инструментов, выдерживающих стерилизацию паром, оксидом этилена, перекисью водорода или гамма-излучением. Полифениленсульфон является уникальным материалом, выдерживающим до 1000 циклов стерилизации [31,33].

Необходимо отметить, что прозрачность полифениленсульфона также является одним из требований возможности применения материалов в медицинских изделиях. Полифениленсульфон и полисульфон – группа пластиков, которые можно использовать в долговечных имплантируемых медицинских устройствах, которые контактируют с тканями человека в течение 30 дней и более [34,35,36].

О свойствах полифениленсульфона и применении написано множество научных работ [37-51], которые обосновывают развитие и исследование данного суперконструкционного пластика в различных отраслях промышленности в том числе и медицине.

Выводы

Полисульфоны, в том числе и полифениленсульфон, представляют значительный интерес для использования в различных областях медицины, начиная с изготовления деталей для инструментов и различных приспособлений и заканчивая имплантатами и протезами различных форм, конфигураций, назначения. В связи с отсутствием промышленного производства полифениленсульфона и наличием небольших отдельных опытно-промышленных партий других производителей полисульфонов, проблема разработки технологий и организации производства полифениленсульфона остается актуальной.

Импорт зарубежных марок полифениленсульфона не позволит решить проблему дефицита его на Российском рынке.

Важной является проблема создания полифениленсульфона, пригодного для использования в 3D-

печати, что требует разработки специальных марок, обладающих определенным комплексом свойств.

Не следует забывать и о вопросах контроля качества, который является обязательным требованием для производства пластика для здравоохранения.

Работа выполнена в рамках реализации Программы развития ФГБОУ ВО «КНИТУ» (ПСАЛ Приоритет 2030)

Литература

1. И.А. Богданов, *Проблемы прогнозирования*, **3**, 192, 42-49 (2022).
2. С.В. Шереметьев, Е.А. Сергеева, И.Н. Бакирова, Л.А. Зенитова, И.Ш. Абдуллин, *Вестник Казан. технол. ун-та*, **20**, 1,1164-167 (2012).
3. Е.М. Штейнберг, Е.А. Сергеева, Л.А. Зенитова, И.Ш. Абдуллин, *Вестник Казанского технологического университета*, **20**, 1, 168-171 (2012).
4. А.Н. Даутова, В.В. Янов, Е.М. Штейнберг, Л.А. Зенитова, *Вестник Казанского технологического университета*, **17**, 1, 124-126 (2013).
5. A. Slonov, I Musov, A Zhansitov, Z Kurdanova, K Shakhmurzova, S Khashirova, *Materials (Basel)*, **15**, 18, 5-10 (2022).
6. А. Жанситов, Ж. Курданова, К. Шахмурзова, А. Слонов, И. Борисов, С. Хаширова, *Полимеры*, **15**,10, 1-11 (2023).
7. Tertmest Instrument [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://thermtest.com/testing-5-polyphenyl-sulfone-pps-polyphenylene-sulfide-pps>
8. Композиты России – Режим доступа: <https://emtc.ru/news/2742>.
9. А.Н. Даутова, В.В. Янов, Л.А. Зенитова, *Вестник Казанского технологического университета*, **8**,1 (2012)
10. Global Sulfone Polymers Market 2024–2033. – Режим доступа: <https://www.custommarketinsights.com/report/sulfone-polymers-market/>.
11. Global Polyphenylene Sulfone Resins Market Size, Scope And Forecast Report. – Режим доступа: <https://www.marketresearchintellect.com/product/global-polyphenylene-sulfone-resins-market/>.
12. Key Applications of Polyphenylene Sulfone Resins. – Режим доступа: <https://www.palmercruz.com/reports/polyphenylene-sulfone-resins-market>.
13. BASF. – Режим доступа: <https://eng.wgj.com.tw/ec99/rwd1588/product.asp?prodid=T RANSPARENT006>.
14. Т. В. Плиско, А. В. Бильдюкевич, Я. А. Исайчикова, В. В. Волков, *Доклады Национальной академии наук Беларуси*, **61**, 1, 54-60 (2017)
15. А.Н. Даутова, В.В. Янов, Л.А. Зенитова, *Вестник Казанского технологического университета*, **8**, 1, 87-92 (2012)
16. И.А. Малаев, М.Л. Пивовар, *Вестник фармации*, **2**, 84, 98-105 (2019).
17. Г.П. Котельников, А.Н. Николаенко, Н.В. Попов и др., *Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи*, **1**, 1, 20-26 (2017).
18. Е.М. Штейнберг, Л.А. Зенитова, *Международный научно-исследовательский журнал*, **6**, 6, 23-28 (2012).
19. А. Л. Слонов [и др.], *Пластические массы*, **7**, 8, 34–37 (2018).
20. A.L. Slonov, A.A. Zhansitov, E.V. Rzhetskaya, *Fibre Chem*, **50**, 1, 354–360 (2018).
21. Е.В.Ржевская. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» (г. Нальчик), 2019. 119с.
22. Ж.И. Курданова. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. хим. наук, Федеральное государственное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им.А.М. Несмеянова Российской академии наук (ИНЭОС РАН), Москва, 2017. 126 с. – Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/sintez-i-svoistva-polifenilensulfona-i-ego-sopolimerov-dlya-primeneniya-v-additivnykh-tekhno>.
23. А.А. Хаширов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата тех. наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт высокомолекулярных соединений РАН (ИВС РАН), г. Санкт-Петербург, 2019. 124 с. – Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/vliyanie-tekhnologicheskikh-rezhimov-fdm-pechati-na-svoistva-izdelii-iz-polifenilensulfona>.
24. И.В. Поляков. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»), Санкт Петербург, 2023. 114 с. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-poliiimidnykh-kompozitsionnykh-materialov-dlya-endoprotezirovaniya-s-ispolzovaniem>.
25. Д.М. Хакулова. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», Нальчик, 2018. 121 с. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-kompozitsionnykh-materialov-na-osnove-polifenilensulfona-dlya-3d-pechati>.
26. А.А. Жанситов, И.В. Мусов, А.Л. Слонов, А.Э. Байказиев, К.Т. Шайхмурзова, С.Ю. Хаширова, *Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы III Всероссийской научно-технической конференции ФГУП «ВИАМ»*, 123-135 (2018). – Режим доступа: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1118.pdf>.
27. С.Ю. Хаширова, А.А. Жанситов, А.А.Хаширов, А.Л. Слонов, И.В.Мусов, *Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы III Всероссийской научно-технической конференции ФГУП «ВИАМ»*, 384-396 (2018).
28. A.L. Slonov, A.A. Zhansitov, D.M. Khakulova, *Fibre Chem* **50**, 1, 373–377.
29. Д.А. Мирошниченко, Н.Л. Корнилова, И.В. Мусов, А.Л. Слонов, С.Ю. Хаширова, *Технология текстильной промышленности*, **5**, 401, 36-45. (2022).
30. Solvay: Recent Medical Applications of Sulfone Polymer Technology – Режим доступа: <https://www.medicalplasticsnews.com/news/latest-medical-plastics-news/polysulfones-in/>.
31. B.L. Dickinson, *J Biomater Appl*, **3**, 4, 34-40 (1989).
32. High Performance Polysulfone for Healthcare Applications. – Режим доступа: <https://www.amcopolymers.com/resources/blog/polysulfone-healthcare-applications>.
33. Schönhoff LM, Mayinger F, Eichberger M, Lösch A, Reznikova E, Stawarczyk B, *J Prosthet Dent*. 2022 **128**, 1. 93-99.
34. What is Polysulfone? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.genesismedicalplastics.com/what-is-polysulfone/>.
35. В.В. Бавлакова. Автореф. дис. канд. мед. Наук, ВМА, Волгоград, 1999. 120 с.

36. О.В. Марымов. Автореф. дис. ... канд. мед. наук, СГМУ, Самара, 1995. 115 с.
37. А.Л. Слонов, И.В. Мусов, Ж.И. Курданова, Е.В. Ржевская, А.А. Жанситов, С.Ю. Хаширова, *Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы III Всероссийской научно-технической конференции ФГУП «ВИАМ»*, 384-396 (2018).
38. И. В. Долбин, Ж. И. Курданова, А. С. Шабаев, С. Ю. Хаширова, *Прикладная физика*, **6**, 1, 83-89 (2017).
39. A. Althala, D. Alomar, I. Musin, *Russ J Gen Chem*, **94**, 1, 55-61 (2024).
40. К.Т. Шахмурзова, Ж.И. Курданова, А.А. Жанситов, А.Э. Байказиев, В.А. Гучинов, С.Ю. Хаширова, *Известия КБГУ*, **6**, 3, 64 (2016).
41. Н. Копицына [и др.], *Высокомолекулярные соединения (серия Б)*, **60**, 3, 211-220 (2018).
42. Namiki, M. *Proceedings of the Society of the Advancement of Material and Process Engineering*, **45**, 1, 187-196. 135 (2014).
43. П. Н. Терехин [и др.], *Современные проблемы науки и образования*, **4**, 1, 29-31 (2013).
44. K. C. Chuang, *NASA CAMX. Conference Proceedings*, **1**, 1-16 (2015).
45. М.Л. Кербер, А.М. Буканов, С.И. Вольфсон, *Научные основы и технологии*, **1**, 1, 318 (2013).
46. А.А. Беев, Д.А. Беева, И.В. Мусов, Е.В. Ржевская, С.Ю. Хаширова, *Химические волокна*, **6**, 1, 66-68 (2018).
47. V. Kishore, X. Chen, Ch. Ajinjeru, H.A. Arabi, J. Lindahl, J. Failla, V. Kunc, Ch. Duty, *An Additive Manufacturing Conference: Proceedings of the 26th Annual International. Solid Freeform Fabrication Symposium*, **1**, 1, 1-10 (2016).
48. Пат. РФ 2054015 (1996).
49. Пат. РФ 2686916 (2019).
50. М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. *Аддитивные технологии в машиностроении*, **1**, 1, 220 (2015).
51. К вопросу о новых применениях полифениленсульфона – Режим доступа: https://polyprofi.ru/blogs/Blog_Igor_Tsapenko/k-voprosu-о-novykh-primeneniya-kh-polifenilensulfona.php.
10. Global Sulfone Polymers Market 2024-2033. - Access mode: <https://www.custommarketinsights.com/report/sulfone-polymers-market/>.
11. Global Polyphenylene Sulfone Resins Market Size, Scope And Forecast Report. - Access Mode: <https://www.marketresearchintellect.com/product/global-polyphenylene-sulfone-resins-market/>.
12. Key Applications of Polyphenylene Sulfone Resins. - Access Mode: <https://www.palmercruz.com/reports/polyphenylene-sulfone-resins-market>.
13. BASF. - Access mode: <https://eng.wgj.com.tw/ec99/rwd1588/product.asp?prodid=TRANSPARENT006>.
14. T. V. Plisko, A. V. Bilydukevich, Y. A. Isaichikova, V. V. Volkov, *Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, **61**, 1, 54-60 (2017) - Mode of access: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28839817>.
15. A.N. Dautova, V.V. Yanov, L.A. Zenitova, *Herald of Kazan Technological University*, **8**, 1, 87-92 (2012).
16. I.A. Malayev, M.L. Pivovar, *Vestnik farmacii*, **2**, 84, 98-105 (2019).
17. G.P. Kotelnikov, A.N. Nikolaenko, N.V. Popov et al, *Sarcomas of bone, soft tissue and skin tumours*, **1**, 1, 20-26 (2017).
18. E.M. Shteinberg, L.A. Zenitova, *International Research Journal*, **6**, 6, 23-28 (2012).
19. A. L. Slonov [et al], *Plastic Masses*, **7**, 8, 34-37 (2018).
20. A.L. Slonov, A.A. Zhansitov, E.V. Rzhetskaya, *Fibre Chem*, **50**, 1, 354-360 (2018).
21. E.V. Rzhetskaya. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education 'Kabardino-Balkarian State University named after K.M. Berbekov'. Kh.M. Berbekov' (Nalchik), 2019. 119 p.
22. Zh.I. Kurdanova. Dissertation abstract for the degree of Candidate of Chemical Sciences, Federal State Institution of Science A.M. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the Russian Academy of Sciences (INEOS RAS), Moscow, 2017. 126 p. - Access mode: <https://www.dissercat.com/content/sintez-i-svoistva-polifenilensulfona-i-ego-sopolimerov-dlya-primeneniya-v-additivnykh-tekhno>.
23. A.A. Khashirov. Dissertation abstract for the degree of Candidate of Technical Sciences, Federal State Budgetary Institution of Science Institute of High Molecular Compounds of the Russian Academy of Sciences (IVS RAS), St. Petersburg, 2019. 124 p. - Access mode: <https://www.dissercat.com/content/vliyanie-tehnologicheskikh-rezhimov-fdm-pechati-na-svoistva-izdelii-iz-polifenilensulfona>.
24. I.V. Polyakov. Dissertation abstract for the degree of Candidate of Technical Sciences, Federal state autonomous educational institution of higher education 'Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University' (FGAOU VO 'SPbPU'), St. Petersburg, 2023. 114 p. Access mode: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-poliimidnykh-kompozitsionnykh-materialov-dlya-endoprotezirovaniya-s-ispolzovaniem>.
25. D.M. Khakulova. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education 'Kabardino-Balkarian State University named after K.M. Berbekov'. Kh.M. Berbekov', Nalchik, 2018. 121 p. Access mode: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-kompozitsionnykh-materialov-na-osnove-polifenilensulfona-dlya-3d-pechati>.
26. A.A. Zhansitov, I.V. Musov, A.L. Slonov, A.E. Baikaziev, K.T. Shaykhmurzova, S.Y. Khashirova, *Polymer composite materials and production technologies of new generation: proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference of FSUE 'VIAM'*, 123-135 (2018). - Access mode: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1118.pdf>.

References

1. I.A. Bogdanov, *Problems of Forecasting*, **3**, 192, 42-49 (2022).
2. S.V. Sheremetev, E.A. Sergeeva, I.N. Bakirova, L.A. Zenitova, I.Sh. Abdullin, *Vestnik of Technological University*, **20**, 1, 1164-167 (2012).
3. E.M. Shteinberg, E.A. Sergeeva, L.A. Zenitova, I.Sh. Abdullin, *Herald of Kazan Technological University*, **20**, 1, 168-171 (2012).
4. A.N. Dautova, V.V. Yanov, E.M. Shteinberg, L.A. Zenitova, *Herald of Kazan Technological University*, **17**, 1, 124-126 (2013).
5. A. Slonov, I Musov, A Zhansitov, Z Kurdanova, K Shakhmurzova, S Khashirova, *Materials (Basel)*, **15**, 18, 5-10 (2022).
6. A Zhansitov, Z Kurdanova, K Shakhmurzova, A Slonov, I Borisov, S Khashirova, *Polymers*, **15**, 10, 1-11 (2023).
7. Tertmest Instrument [Electronic resource]. - Mode of access: <https://thermtest.com/testing-5-polyphenyl-sulfone-pps-polyphenylene-sulfide-pps>
8. Composites of Russia- Mode of access: <https://emtc.ru/news/2742>.
9. A.N. Dautova, V.V. Yanov, L.A. Zenitova, *Bulletin of Kazan Technological University*, **8**, 1 (2012). - Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvo-meditsinskih-instrumentov-iz-metallozameschayuschih-polimernykh-materialov-obzor>.

27. S.Y. Khashirova, A.A. Zhansitov, A.A. Khashirov, A.L. Slonov, I.V. Musov, *Polymer composite materials and production technologies of new generation : proceedings of the III All-Russian scientific and technical conference of FSUE 'VIAM'*, 384-396 (2018).
28. A.L. Slonov, A.A. Zhansitov, D.M. Khakulova, *Fibre Chem* 50, 1, 373-377.
29. D.A. Miroshnichenko, N.L. Kornilova, I.V. Musov, A.L. Slonov, S.Y. Khashirova, *Technology of Textile Industry*, 5, 401, 36-45. (2022).
30. Solvay: Recent Medical Applications of Sulfone Polymer Technology - Mode of access: <https://www.medicalplasticsnews.com/news/latest-medical-plastics-news/polysulfones-in/>.
31. B.L. Dickinson, *J Biomater Appl*, 3, 4, 34-40 (1989).
32. High Performance Polysulfone for Healthcare Applications. - Access mode: <https://www.amcopolymers.com/resources/blog/polysulfone-healthcare-applications>.
33. Schönhoff LM, Mayinger F, Eichberger M, Lösch A, Reznikova E, Stawarczyk B, *J Prosthet Dent*. 2022 **128**, 1, 93-99.
34. What is Polysulfone? [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.genesismedicalplastics.com/what-is-polysulfone/>.
35. V.V. Bavlakova. Avtoref. dis. kand. med. Sciences, VMA, Volgograd, 1999. 120 p.
36. O.V. Marymov. Avtoref. dis. Candidate of Medical Sciences, SSMU, Samara, 1995. 115 p.
37. A.L. Slonov, I.V. Musov, J.I. Kurdanova, E.V. Rzhetskaya, A.A. Zhansitov, S.Y. Khashirova, *Polymer composite materials and production technologies of new generation : proceedings of the III All-Russian Scientific and Technical Conference of FSUE 'VIAM'*, 384-396 (2018). - Mode of access: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1118.pdf>.
38. I. V. Dolbin, J. I. Kurdanova, A. S. Shabaev, S. Y. Khashirova. *Applied Physics*, 6, 1, 83-89 (2017).
39. A. Altahla, D. Alomar, I. Musin, *Russ J Gen Chem*, 94, 1, 55-61 (2024).
40. K.T. Shakhmurzova, J.I. Kurdanova, A.A. Zhansitov, A.E. Baikaziev, V.A. Guchinov, S.Y. Khashirova, *Izvestiya KBGU*, 6, 3, 64 (2016).
41. N. Kopitsyna [et al], *High molecular weight compounds (Series B)*, 60, 3, 211-220 (2018).
42. Namiki, M. *Proceedings of the Society of the Advancement of Material and Process Engineering*, 45, 1, 187-196. 135 (2014).
43. P. N. Terekhin [et al], *Sovremennye Problems of Science and Education*, 4, 1, 29-31 (2013).
44. K. C. Chuang, *NASA CAMX. Conference Proceedings*, 1, 1-16 (2015).
45. M. L. Kerber, A. M. Bukanov, S. I. Wolfson, *Scientific Foundations of Science and Technology*, 1, 1, 1, 1, 1, 1-16 (2015). *and Technologies*, 1, 1, 318 (2013).
46. A.A. Beyev, D.A. Beyeva, I.V. Musov, E.V. Rzhetskaya, S.Y. Khashirova, *Chemical Fibres*, 6,1, 66-68 (2018).
47. V. Kishore, X. Chen, Ch. Ajinjeru, H.A. Arabi, J. Lindahl, J. Failla, V. Kunc, Ch. Duty, *An Additive Manufacturing Conference: Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1, 1, 1-10 (2016).
48. Pat. RF 2054015 (1996).
49. Pat. RF 2686916 (2019).
50. M.A. Zlenko, M.V. Nagaytsev, V.M. Dovbysh, *Additive technologies in Mechanical Engineering*, 1, 1, 220 (2015).
51. Towards new applications of polyphenylene sulfone - Mode of access: https://polyprofi.ru/blogs/Blog_Igor_Tsapenko/kvoprosu-o-novykh-primeneniyakh-polifenilensulfona.php.

© **Д. А. Лугова** – студент 2 курса магистратуры группы 731-M5 12.04.04 Биотехнические системы и технологии, лаборант лаборатории Суперконструкционных Полимеров, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ) Казань, Россия, lutovad@bk.ru; **М. С. Лисаневич** – к.т.н., доцент кафедры Медицинской Инженерии (МИ), КНИТУ, lisanevichms@gmail.com; **А. А. Никифоров** – к.т.н., заведующий лабораторией Переработки полимерных материалов, КНИТУ, NikiforovAA@corp.knrtu.ru; **И. Н. Мусин** – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой МИ, КНИТУ, imusin@kstu.ru; MusinIN@corp.knrtu.ru; **И. В. Волков** – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой Технология переработки полимеров и композиционных материалов, КНИТУ, VolkovIV@corp.knrtu.ru; **Р. А. Ахмедьянова** – д.т.н., профессор кафедры Технологии синтетического каучука, КНИТУ, achra108@rambler.ru.

© **Д. А. Lutova** – 2nd year Master-student, group 731-M5, 12.04.04 Biotechnical systems and technologies, Laboratory Assistant, Laboratory of Superstructural Polymers, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, lutovad@bk.ru; **M. S. Lisanevich** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Medical Engineering (ME), KNRTU, lisanevichms@gmail.com; **A. A. Nikiforov** – Ph.D (Technical Sci.), Head of Laboratory of Polymer Materials Processing, KNRTU, NikiforovAA@corp.knrtu.ru; **I. N. Musin** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Head of the ME department, KNRTU, imusin@kstu.ru; MusinIN@corp.knrtu.ru; **I. V. Volkov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Head of the department of Polymer and Composite Materials Processing Technology, KNRTU, VolkovIV@corp.knrtu.ru; **R. A. Akhmed'yanova** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the department of Synthetic Rubber Technology, KNRTU, achra108@rambler.ru