

Оригинальная статья

УДК 66.081.6

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.644-657>**Влияние паровой стерилизации на морфологию и механические свойства полуволоконных мембран из полифениленсульфона****А.Ю. Раева^{1,2}✉, Д.Н. Матвеев², Т.С. Анохина², А.А. Жанситов¹, С.Ю. Хаширова¹,
В.В. Волков^{1,2}, И.Л. Борисов^{1,2}**¹*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик, Россия*²*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук,
г. Москва, Россия*✉raevaau@ips.ac.ru**Аннотация**

В работе впервые рассмотрено влияние обработки полуволоконных мембран из полифениленсульфона (ПФСФ) и полисульфона (ПСФ) перегретым водяным паром в условиях автоклавирования в течение 270 ч. Исследование направлено на оценку стабильности мембран при многократной паровой стерилизации, что является важным аспектом применения мембран для очистки сред, содержащих, например, патогенные организмы. Установлено, что мембраны на основе ПФСФ характеризуются высокой термо- и гидролитической устойчивостью. Показана возможность многократной стерилизации ПФСФ мембран без потери эксплуатационных характеристик. Полученные данные подтверждают перспективность использования ПФСФ в качестве материала для создания долговечных и надежных полуволоконных мембран, применение которых требует проведения частых циклов стерилизации.

Ключевые слова: полифениленсульфон, полуволоконная мембрана, стерилизация, автоклавирование, механические свойства, морфология.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (№ 22-19-00711-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00711/>).

Для цитирования: Раева А.Ю., Матвеев Д.Н., Анохина Т.С., Жанситов А.А., Хаширова С.Ю., Волков В.В., Борисов И.Л. Влияние паровой стерилизации на морфологию и механические свойства полуволоконных мембран из полифениленсульфона // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2025. Т. 167, кн. 4. С. 644–657. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.644-657>.

Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.644-657>

Effect of steam sterilization on the morphology and mechanical properties of polyphenylene sulfone hollow fiber membranes

A.Yu. Raeva^{1,2}✉, D.N. Matveev², T.S. Anokhina², A.A. Zhansitov¹, S.Yu. Khashirova¹,
V.V. Volkov^{1,2}, I.L. Borisov^{1,2}

¹Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

²A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉raevaau@ips.ac.ru

Abstract

The effect of treatment of polyphenylene sulfone (PPSU) and polysulfone (PSU) hollow fiber membranes with superheated water steam under autoclaving conditions for 270 h was investigated for the first time. The resistance of these membranes to repeated steam sterilization, a key parameter for their application in the purification of media that may contain pathogenic organisms, was evaluated. PPSU membranes were found to exhibit high thermal stability and resistance to hydrolysis and retain their functional characteristics after multiple sterilization cycles. The obtained data underscore the potential of PPSU as a promising material for creating durable and reliable hollow fiber membranes to carry out processes that necessitate the use of repeated sterilization.

Keywords: polyphenylene sulfone, hollow fiber membrane, sterilization, autoclaving, mechanical properties, morphology

Acknowledgments. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-19-00711-P, <https://rscf.ru/project/22-19-00711/>).

For citation: Raeva A.Yu., Matveev D.N., Anokhina T.S., Zhansitov A.A., Khashirova S.Yu., Volkov V.V., Borisov I.L. Effect of steam sterilization on the morphology and mechanical properties of polyphenylene sulfone hollow fiber membranes. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2025, vol. 167, no. 4, pp. 644–657. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.644-657>. (In Russian)

Введение

Несмотря на большие запасы воды на планете (водой покрыто около 70 % поверхности Земли), достаточно остро стоит проблема обеспеченности чистой питьевой водой. Согласно докладу Организации Объединенных Наций о состоянии мировых водных ресурсов, к 2030 году почти половина населения планеты будет жить в районах с высоким уровнем дефицита воды [1], причиной которого, в первую очередь, является деятельность человека. В связи с этим необходимы новые и более эффективные способы получения чистой воды.

Все большее распространение в процессах очистки воды получают мембранные процессы, поскольку они просты в использовании, исключают применение химических реагентов,

легко интегрируются в технологические процессы и надежны [2]. Так, процесс ультрафильтрации позволяет эффективно удалять из воды органические молекулы, болезнетворные бактерии и вирусы, а также улучшать ее вкусовые характеристики [3]. Следует отметить, что в случаях удаления патогенов необходимо проводить периодическое обеззараживание очистительных сооружений во избежание биологического засорения [4].

В течение многих лет для стерилизации мембранных систем применяют химические методы, в числе которых обработка формальдегидом, гипохлоритом натрия, каустической содой, перекисью водорода и надуксусной кислотой [4, 5]. Применение этих методов ограничено из-за токсичности реагентов как с экологической, так и с эксплуатационной точки зрения. При этом достижение цели химической стерилизации часто оказывается сложной задачей, поскольку микроорганизмы очень легко приспосабливаются к неблагоприятным условиям. Они вырабатывают новые устойчивые штаммы даже в чрезвычайно жестких химических условиях.

В настоящее время наиболее дешевым и простым способом стерилизации является обработка перегретым паром, так как она обеспечивает уничтожение микроорганизмов за счет высокой степени проникновения в материал. Кроме того, подход характеризуется отсутствием токсичных продуктов, легкостью и быстротой организации процесса [6, 7].

Важным аспектом в использовании мембран для процессов удаления патогенных организмов является их устойчивость к процессу стерилизации. По этой причине возникает проблема выбора мембранного материала, который способен сохранять неизменными свои характеристики в среде насыщенного водяного пара. Несмотря на наличие керамических материалов, современные исследования демонстрируют значительный прогресс в области полимерных мембран [8], что обусловлено их преимуществами, такими, как технологичность производства и низкая стоимость. Поэтому актуальной задачей является создание мембран из полимеров, способных выдерживать многократную обработку перегретым паром.

Среди полимеров специального назначения все большее распространение получает полифениленсульфон (ПФСФ), так как он обладает высокими показателями термической, химической и гидролитической устойчивости. Согласно данным, предоставляемым промышленными производителями полимеров (BASF, Solvay), ПФСФ демонстрирует выдающуюся способность к обработке перегретым паром без потери своих первоначальных механических характеристик в течение длительного времени (не менее 10000 циклов обработки) [9, 10]. Поэтому сейчас ПФСФ активно используют в сфере здравоохранения для изготовления стерилизационных и медицинских приборов. Очевидно, что такой материал перспективен для создания на его основе фильтрационных мембран.

Так, разработана полуволоконная мембрана из ПФСФ с проницаемостью по воде $136 \text{ л}/(\text{м}^2 \times \text{ч} \times \text{атм})$ при коэффициенте задерживания модельного красителя Blue Dextran с молекулярной массой 70 кг/моль 96 % [11]. На данный момент это лучший результат, достигнутый в процессе фильтрационной очистки воды с помощью ультрафильтрационной полуволоконной мембраны из чистого ПФСФ. Увеличения проницаемости удалось добиться путем варьирования величины молекулярной массы матричного полимера. Наилучший результат получен для ПФСФ с молекулярной массой 80 кг/моль . Также выявлена зависимость проницаемости мембран от химической структуры концевых групп. Показано, что преобладание концевых атомов хлора в структуре ПФСФ позволяет получить более разви-

тую пористую структуру с большим количеством пальцеобразных пор в подложечном слое, выходящих к внешней поверхности полого волокна [11].

Целью настоящей работы является оценка влияния насыщенного водяного пара в условиях автоклавирования на морфологию и механические характеристики половолоконных мембран из ПФСФ. В качестве материала сравнения для создания половолоконных мембран был выбран полисульфон (ПСФ), также относящийся к ряду полиариленсульфонов и представляющий собой один из наиболее распространенных материалов для создания ультрафильтрационных мембран, в том числе медицинского назначения [12].

1. Материалы и методы

1.1. Материалы. Синтез ПФСФ проводили согласно методике, описанной в работе [11]. Избыток мономера дихлордифенилсульфона составил 6 % (мол.). Для сравнения эксплуатационных свойств половолоконные мембраны также получали на основе коммерческого полимера полисульфона (ПСФ) марки Ultrason® S 6010 (BASF, Германия), который используют в промышленном производстве мембранных ультрафильтрационных модулей. Растворителем выступал *N*-метилпирролидон марки х.ч. (Химмед, Россия), а в качестве порообразующей добавки – полиэтиленгликоль с молекулярной массой 400 г/моль (Sigma-Aldrich, США).

1.2. Исследование молекулярно-массовых характеристик полимеров. Гель-проникающую хроматографию (ГПХ) полимеров проводили на системе Waters (США) (коллонка Chromatopack Microgel-5, элюент – хлороформ, скорость потока 1 мл/мин) с дифференциальным рефрактометром в качестве детектора. Молекулярные массы и полидисперсность образцов рассчитывали по стандартной методике относительно монодисперсных полистирольных стандартов.

Спектры ^1H ядерного магнитного резонанса (ЯМР) высокого разрешения получены на ЯМР-спектрометре AVANCE III HD 400 (Bruker, Германия) для растворов в CDCl_3 по стандартной методике. Среднечисловую молекулярную массу M_N для каждого синтезированного образца вычисляли по данным ЯМР-спектроскопии как отношение площади пика, соответствующего сегменту основной полимерной цепи, к площадям пиков, соответствующих сигналам концевых гидроксильных групп и атомов хлора.

1.3. Приготовление формовочных растворов. В ходе работы были приготовлены формовочные растворы состава полимер/*N*-метилпирролидон/полиэтиленгликоль в массовом соотношении (%) 20 : 50 : 30, выбранного согласно данным, полученным ранее в работе [11]. Растворы для формования перемешивали в течение 20 ч при комнатной температуре до полной гомогенизации. Затем растворы фильтровали под давлением инертного газа 2 атм через сетку из нержавеющей стали с ячейками размера 4–5 мкм.

1.4. Определение динамической вязкости формовочных растворов проводили с помощью ротационного реометра Anton Paar MCR 72 (Австрия), оснащенного измерительным узлом CP60-0.5 типа конус–плоскость. Скорость сдвига составляла 10 с^{-1} , а температура – 23 °С.

1.5. Получение половолоконных мембран. Половолоконные мембраны получали методом сухо-мокрого формования в варианте «свободного прядения». Формовочный раствор под давлением инертного газа 2 бар подавали на формовочную кольцевую фильеру с внешним диаметром 1.0 мм и внутренним диаметром 0.5 мм. Во внутренний канал волокна

в качестве осадителя подавали дистиллированную воду. Величина воздушного зазора в ходе формования составила 0.5 м. Формуемое волокно под действием силы тяжести поступало в осадительную ванну, наполненную водой. После формования полволоконные мембраны выдерживали в дистиллированной воде в течение 20 ч. Методика формования подробно описана в работе [13].

1.6. Сканирующая электронная микроскопия. Структура и морфология мембран охарактеризована методом сканирующей электронной микроскопии на установке Phenom XL G2 Desktop SEM (Thermo Fisher Scientific Inc., США). Сколы мембран получали после предварительной пропитки мембран в изопропанол и последующего разламывания их в среде жидкого азота. С помощью настольного магнетронного напылителя Sputter Coater 108 auto (Cressington Scientific Instruments Ltd., Великобритания) на подготовленные в вакуумной камере (~0.01 мбар) образцы наносили тонкий (5–10 нм) слой золота. Микрофотографии регистрировали при ускоряющем напряжении 15 кэВ. Определение геометрических параметров проводили с помощью программного обеспечения Gwyddion (ver. 2.6).

1.7. Обработка полволоконных мембран перегретым водяным паром. Исследование влияния обработки перегретым водяным паром на морфологию, механические и транспортные свойства ПФСФ мембран проводили с помощью бытового автоклава («Домашний стандарт», Россия). Автоклав выполнен из нержавеющей стали, объем емкости составляет 24 л. Автоклав оборудован карманом для термометра, плавающим выпускным клапаном и аварийным клапаном для сброса давления. В качестве стерилизующего агента в автоклаве использовали дистиллированную воду, температура водяного пара составляла 125 °С, давление – 1.3 атм. Общий вид автоклава и вид сверху приведены на рис. 1.

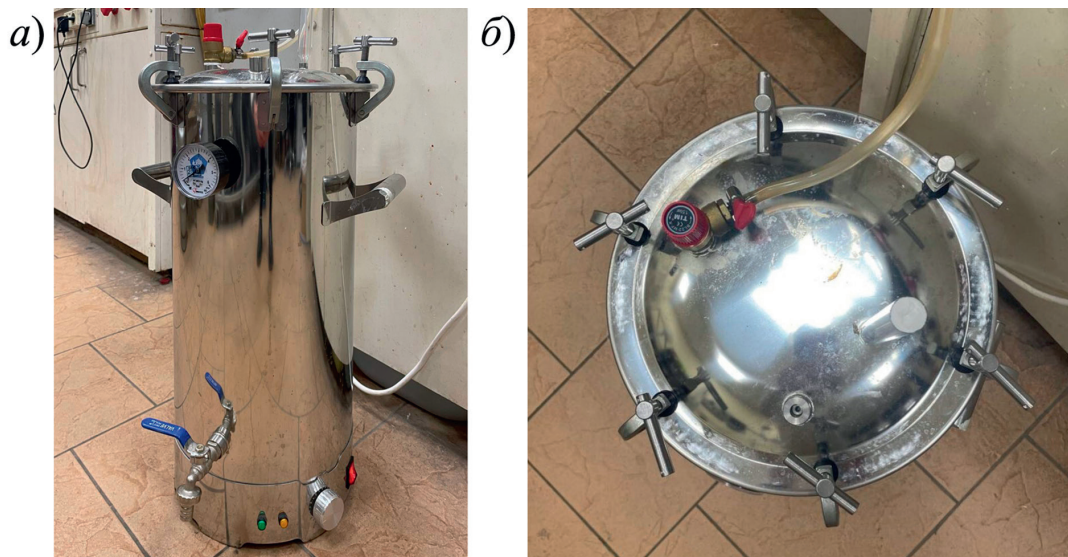


Рис. 1. Общий вид (а) и вид сверху (б) автоклава, используемого для стерилизации полволоконных мембран перегретым водяным паром

Fig. 1. General (a) and top (b) view of the autoclave used for sterilization of hollow fiber membranes by superheated water steam

Половолоконные мембраны из лабораторного образца ПФСФ и коммерческого полимера ПСФ BASF экспонировали в автоклаве в течение 270 ч, отбирая периодически пробные образцы.

1.8. Исследование механических свойств полуволоконных мембран. Механические свойства полуволоконных мембран (модуль упругости и прочность в МПа, а также относительное удлинение при разрыве в %) определяли согласно ГОСТ 11262-2017 [14] на разрывной машине И1140М со скоростью перемещения плунжера 5 мм/мин. Значения модуля упругости определяли как наклон начального (линейного) участка диаграммы напряжение – деформация.

1.9. Статистическая обработка данных. Все результаты представлены как среднее значение для трех параллельных измерений. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием программного пакета Excel (Microsoft Corp., США).

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Исследование молекулярно-массовых характеристик полимеров методами ГПХ и ЯМР. Число концевых гидроксильных групп и атомов хлора, а также среднечисловую молекулярную массу полимеров оценивали методом ЯМР-спектроскопии. Вид ЯМР-спектра ПСФ приведен на рис. 2.

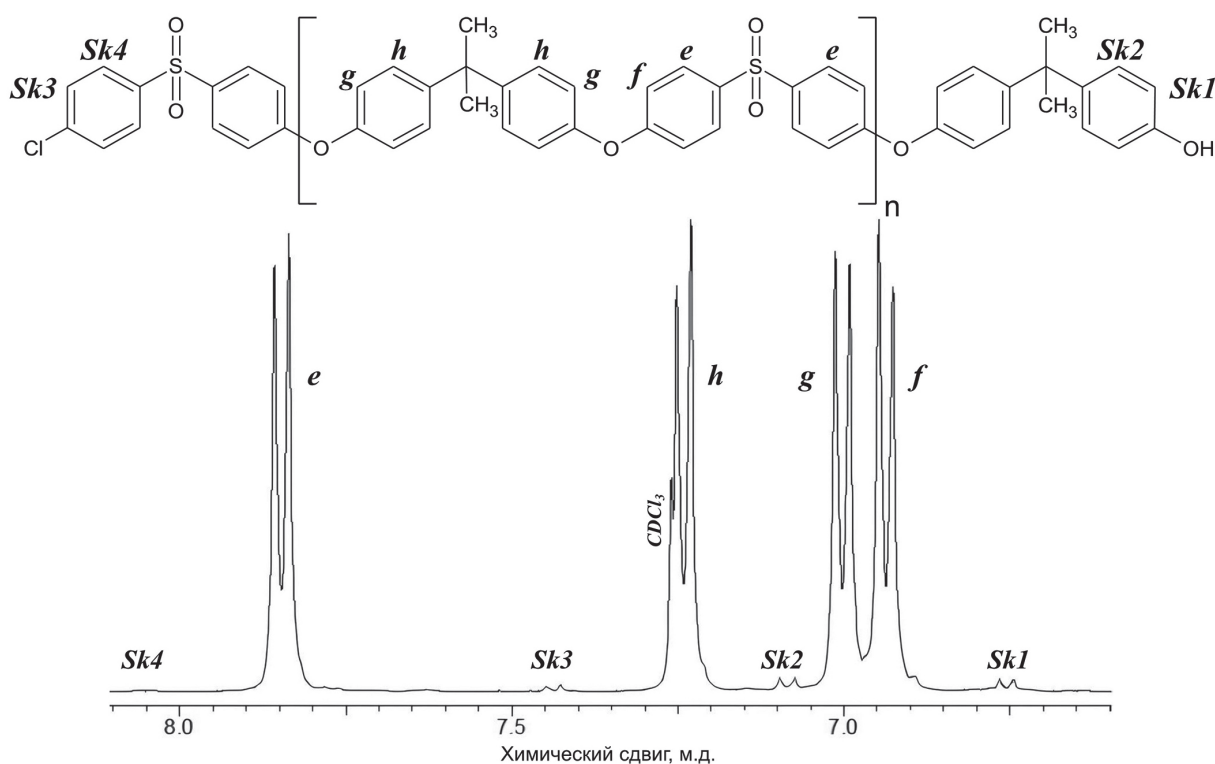


Рис. 2. ^1H ЯМР спектр ПСФ

Fig. 2. ^1H NMR spectrum of PSU

Дублетные сигналы при значениях химических сдвигов δ 7.85 м.д. Н-е (4Н, d), 6.93 м.д. Н-f (4Н, d), 7.00 м.д. Н-g (4Н, d) и 7.24 м.д. Н-h (4Н, d) соответствуют сигналам протонов ароматических колец основной полимерной цепи. Синглетный пик в области δ 1.69 м.д. (6Н, s) отвечает сигналам протонов метильных групп у четвертичного атома углерода в основной полимерной цепи (на рис. 1 не представлен). Дублетные сигналы с δ 6.75 м.д. Н-Sk1 (2Н, d) и 7.08 м.д. Н-Sk2 (2Н, d) отвечают сигналам протонов ароматических колец, связанных с концевыми гидроксильными группами. Дублетные сигналы с δ 7.46 м.д. Н-Sk3 (2Н, d) и 8.04 м.д. Н-Sk4 (2Н, d) отвечают сигналам протонов ароматических колец, связанных с концевыми атомами хлора.

Для ПФСФ ^1H ЯМР спектр приведен на рис. 3. Сигналы при значениях химического сдвига δ 7.90 м.д. Н-а (4Н, *d*), 7.58 м.д. Н-d (4Н, *d*), 7.11 м.д. Н-с (4Н, *d*) и 7.07 м.д. Н-b (4Н, *d*) отнесены к протонам ароматических колец основной полимерной цепи. Пики Pk1 с δ 7.47 м.д. (2Н, *d*) и Pk2 с δ 7.87 м.д. (2Н, *d*) отнесены к протонам концевых ароматических колец, соединенных с концевыми атомами Cl, а сигналы протонов Pk3 с δ 6.92 м.д. (2Н, *d*) и Pk4 с δ 7.44 м.д. (2Н, *d*) – к протонам ароматических колец, соединенных с концевыми HO-группами.

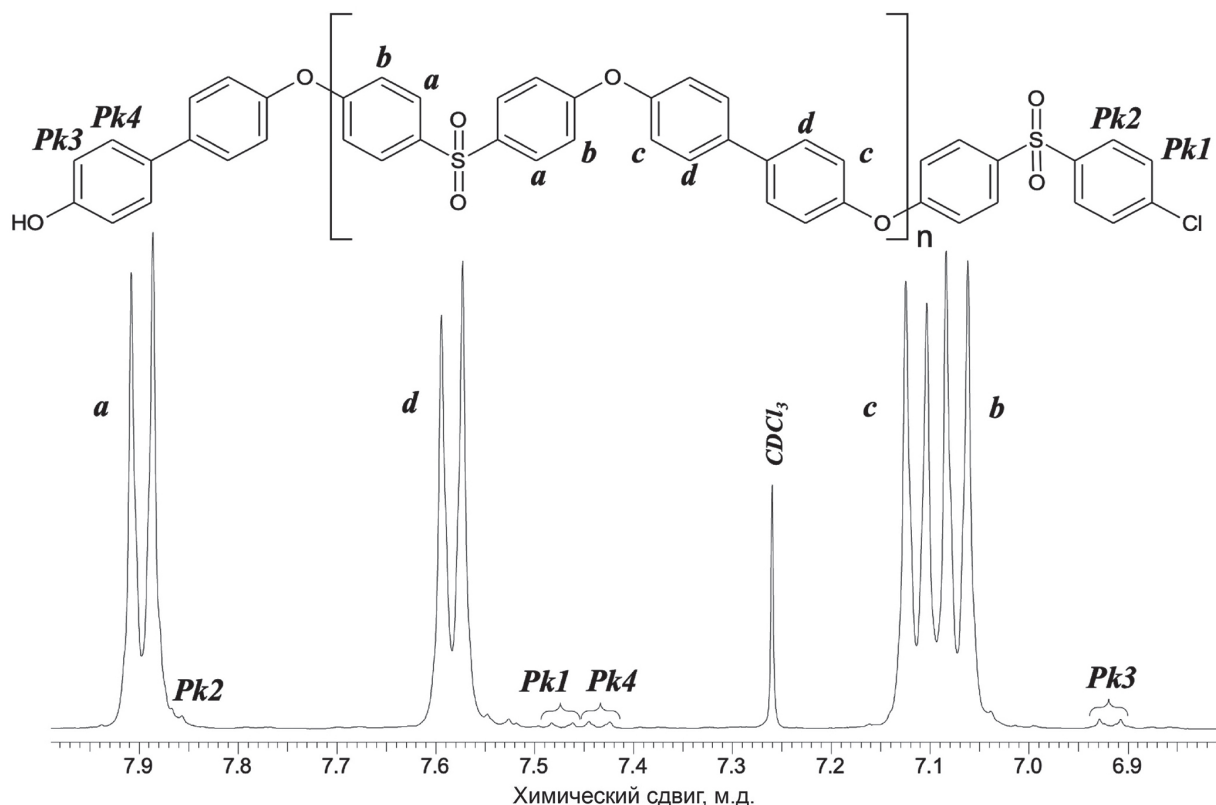


Рис. 3. ^1H ЯМР спектр ПФСФ

Fig. 3. ^1H NMR spectrum of PPSU

Данные ЯМР-спектроскопии и ГПХ обобщены в табл. 1, из которых видно, что среднечисловые молекулярные массы, вычисленные по данным ЯМР, примерно вдвое ниже, чем установленные методом ГПХ. Это обусловлено тем, что в ЯМР-спектроскопии молекулярная масса оценивается по числу концевых групп. При этом метод регистрирует и полимер, и олигомерную фракцию, в которой доля концевых групп значительно выше, чем в полимере. Следовательно, ЯМР-спектроскопия дает заниженные значения молекулярной массы. Однако среднечисловая молекулярная масса, определенная методом ЯМР, качественно коррелирует с данными ГПХ.

Табл. 1. Молекулярно-массовые характеристики полиарилсульфонов

Table 1. Molecular weight characteristics of polyarylene sulfones

Образец	$M_p \times 10^{-3}$, г/моль	$M_w \times 10^{-3}$, г/моль	$M_N \times 10^{-3}$, г/моль	M_w/M_N	M_N (ЯМР), г/моль	ОН : Cl
ПСФ BASF	93	87	52	1.7	23	1 : 1.9
ПФСФ	75	81	24	3.4	13	1 : 2.3

2.2. Исследование динамической вязкости формовочных растворов. Динамическая вязкость формовочного раствора является одним из ключевых параметров для формования полуволоконных мембран. Поэтому на первом этапе работы исследована динамическая вязкость приготовленных формовочных растворов ПФСФ и ПСФ. Формовочный раствор ПФСФ имеет вязкость 42 Па×с. Динамическая вязкость раствора на основе ПСФ BASF составила 19 Па×с. Известно [15], что для формирования полуволоконных мембран формовочный раствор должен иметь динамическую вязкость от 10 до 60 Па×с. Из представленных данных следует, что приготовленные формовочные растворы характеризуются достаточной для прядения полуволоконных мембран вязкостью.

2.2. Изменение морфологии полуволоконных мембран в ходе автоклавирования. На рис. 4 показаны фрагменты боковых сколов полученных полуволоконных мембран из лабораторного образца ПФСФ и коммерческого образца ПСФ BASF. Показано, что обе мембраны обладают развитой пальцеобразной структурой в подложечном слое и плотным тонким селективным слоем по внутренней поверхности полого волокна.

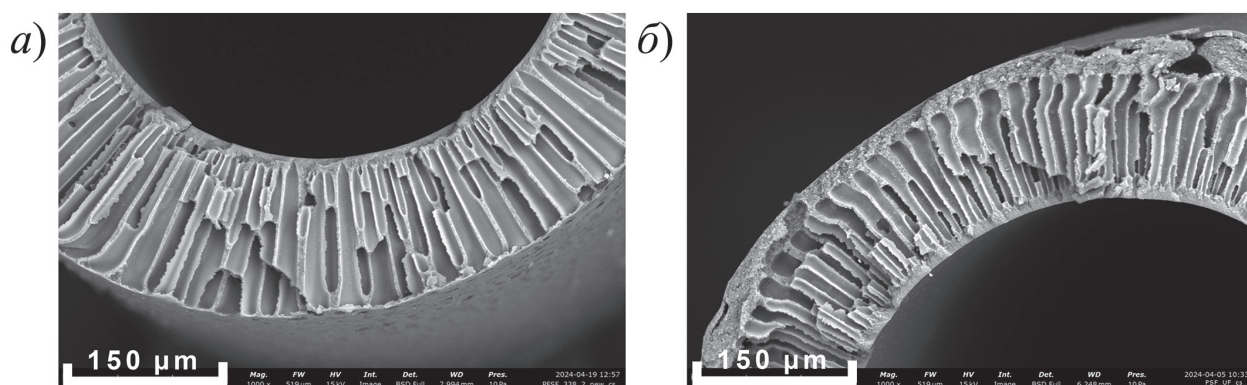


Рис. 4. Изображения сканирующей электронной микроскопии полученных полуволоконных мембран из лабораторного образца ПФСФ (а) и из коммерческого образца ПСФ BASF (б)

Fig. 4. Scanning electron microscopy images of the hollow fiber membranes synthesized from the laboratory PPSU (a) and commercial PSU BASF (b) samples

Полученные полуволоконные мембраны из ПФСФ и ПСФ помещали в автоклав и экспонировали в перегретых водяных парах в течение 270 ч с периодическим отбором образцов. Изменение геометрических параметров полуволоконных мембран представлено на рис. 5. Для полуволоконных мембран из лабораторного образца ПФСФ геометрические параметры (внешний диаметр 890 ± 20 мкм, внутренний диаметр 560 ± 10 мкм, толщина стенки 170 ± 10 мкм) оставались постоянными на протяжении всего времени экспозиции. Геометрические параметры полуволоконных ПСФ мембран начали изменяться после 150 ч экспозиции в автоклаве. За 270 ч экспонирования в среде перегретого пара внешний и внутренний диаметр снизились с 900 ± 10 до 700 ± 10 мкм и с 660 ± 10 до 550 ± 10 мкм соответственно, а толщина стенки уменьшилась с 120 ± 10 до 80 ± 10 мкм. Таким образом, мембраны из ПФСФ обладают большей стабильностью к усадке в среде перегретого пара по сравнению с ПСФ аналогами.

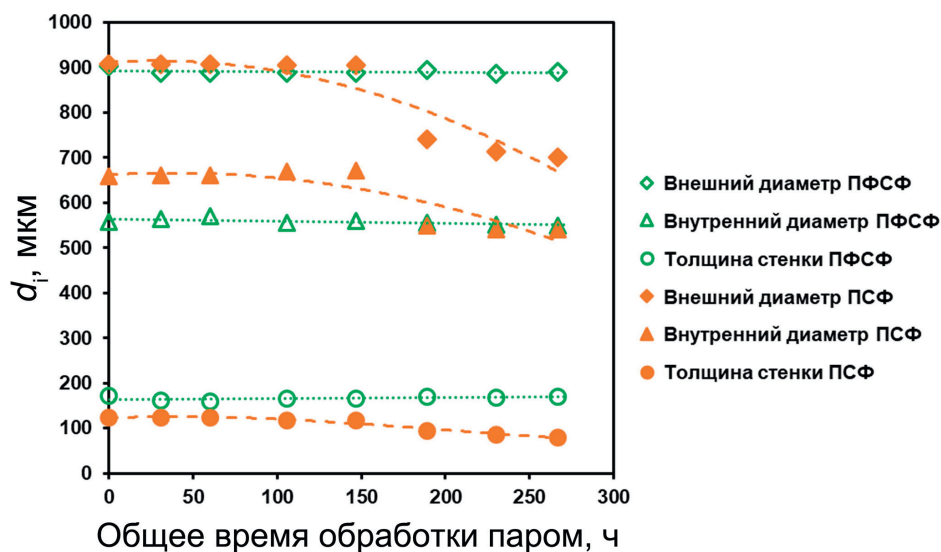


Рис. 5. Зависимость геометрических параметров полуволоконных мембран из лабораторного образца ПФСФ и коммерческого образца ПСФ BASF от времени экспозиции в среде перегретого водяного пара

Fig. 5. Dependence of the geometric parameters of the hollow fiber membranes from the laboratory PPSU and commercial PSU BASF samples on the exposure time in superheated water steam environment

2.3. Изменение механических свойств полуволоконных мембран в ходе автоклавирования. Результаты оценки механических свойств полуволоконных мембран представлены на рис. 6. Из рис. 6, *а* видно, что прочность (σ) полуволоконных мембран из лабораторного образца ПФСФ составляет 34–36 МПа в течение всего времени обработки мембран перегретым водяным паром, то есть изменяется в пределах погрешности измерений. Модуль упругости экспонированных мембран (E) постоянен и равен 710 ± 80 МПа в течение 180 ч обработки паром (рис. 6, *б*). Затем величина E постепенно повышается до значения 990 ± 80 МПа. Это говорит о том, что по мере увеличения времени экспонирования полуволоконных мембран из ПФСФ в среде насыщенного водяного пара (по достижении 200 ч) мембранный материал становится несколько жестче, что также подтверждают данные по относительному удлинению (рис. 6, *в*). Величина относительного удлинения полуволоконных мембран из лабораторного образца ПФСФ после 200 ч обработки мембран паром начинает постепенно снижаться с 30.0 ± 0.6 % до 21.5 ± 0.6 %.

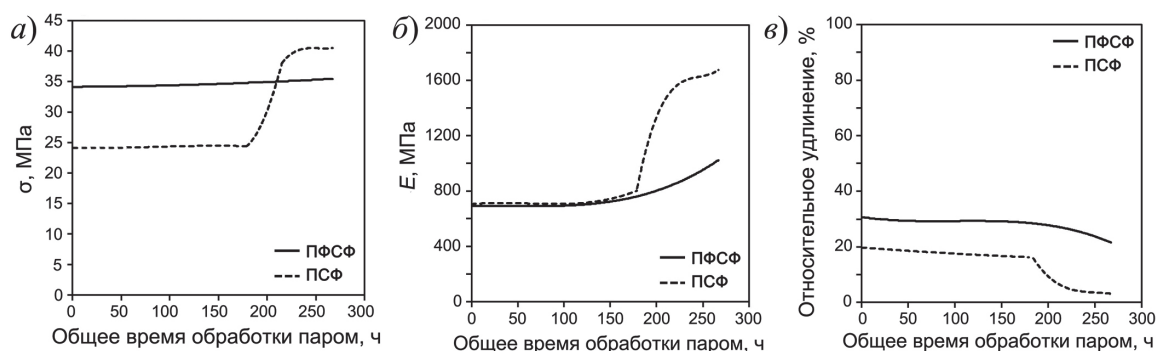


Рис. 6. Зависимость механических свойств (прочность (*а*), модуль упругости (*б*) и относительное удлинение (*в*)) полуволоконных мембран из лабораторного образца ПФСФ и коммерческого ПСФ BASF от времени их обработки паром

Fig. 6. Dependence of the mechanical properties (tensile strength (*a*), tensile modulus (*b*), and elongation at break (*c*)) of the hollow fiber membranes from the laboratory PPSU and commercial PSU BASF samples on the time of steam treatment

Половолоконные мембраны из коммерческого ПСФ BASF демонстрируют прочность 24.5 ± 0.5 МПа при обработке их паром до 180 ч, а затем наблюдается резкое увеличение их прочности в 1.7 раза до значения 41.5 ± 0.5 МПа (рис. 6, б). Такое поведение обусловлено схлопыванием структуры мембран, что подтверждает уменьшение их геометрических параметров. Значения модуля упругости и относительного удлинения (рис. 6, б и в) также свидетельствуют в пользу этого. Модуль упругости остается постоянным (700 ± 80 МПа) в течение 180 ч, и затем возрастает более чем в 2 раза до 1670 МПа при 270 ч. Относительное удлинение при этом закономерно снижается с 20 % до 3.0 % при 270 ч, что говорит об охрупчивании образцов мембран из ПСФ и их деградации.

Заключение

Впервые проведено исследование воздействия перегретого водяного пара в условиях автоклавирования на свойства половолоконных мембран из ПФСФ и ПСФ и оценена их устойчивость при многократных циклах паровой стерилизации. Это имеет критическое значение для дальнейшего применения мембран в процессах очистки водных сред от биологического загрязнения. Половолоконные мембраны из ПФСФ демонстрируют стабильность геометрических параметров после 270 ч обработки водяным паром, а изменения механических характеристик минимальны. Геометрические и механические параметры половолоконных мембран из ПСФ, напротив, претерпевают существенные изменения, указывая на усадку пористой структуры и деструкцию материала мембран.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что половолоконные мембраны на основе ПФСФ проявляют высокую термическую и гидролитическую стабильность, обеспечивающую возможность проведения многократных циклов паровой стерилизации без ухудшения эксплуатационных характеристик. Это обосновывает целесообразность применения ПФСФ в качестве мембранообразующего материала для изготовления долговечных мембранных элементов, предназначенных для эксплуатации в условиях регулярной стерилизационной обработки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. IHP-IX: Strategic Plan of the Intergovernmental Hydrological Programme: Science for a Water Secure World in a Changing Environment, Ninth Phase 2022-2029. Paris: UNESCO/Div. Water Sci., 2022. 51 p.
2. Skoczko I. Energy efficiency analysis of water treatment plants: Current status and future trends // *Energies*. 2025. V. 18, No 5. Art. 1086. <https://doi.org/10.3390/en18051086>.
3. Dharani L., Umapriya R., Rohan J., Surendran G., Gokila M., Infanta M.J. Application of membrane technology for wastewater treatment // Shah M.P. (Ed.) *Microbial Approach of Biofiltration in Industrial Wastewater Treatment for the Sustainability of Environment*. Ser.: Environmental Science and Engineering. Cham: Springer, 2025. P. 37–57. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48150-5_3.
4. Regula C., Carretier E., Wyart Y., Gésan-Guiziou G., Vincent A., Boudot D., Moulin P. Chemical cleaning/disinfection and ageing of organic UF membranes: A review // *Water Res.* 2014. V. 56. P. 325–365. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.050>.
5. Wagner J. *Membrane Filtration Handbook: Practical Tips and Hints*. Minnetonka, MN: Osmonics, 2001. 129 p.

6. Dai Z., Ronholm J., Tian Y., Sethi B., Cao X. Sterilization techniques for biodegradable scaffolds in tissue engineering applications // *J. Tissue Eng.* 2016. V. 7. Art. 2041731416648810. <https://doi.org/10.1177/2041731416648810>.
7. Kaur J. Chapter 24 – Advances in biomedical waste management technologies // Singh P., Verma P., Singh R., Ahamad A. Batalhão A.C.s. (Eds.) *Waste Management and Resource Recycling in the Developing World*. Amsterdam: Elsevier, 2023. P. 543–573. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90463-6.00024-5>.
8. Geise G.M., Lee H.-S., Miller D.J., Freeman B.D., McGrath J.E., Paul D.R. Water purification by membranes: The role of polymer science // *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.* 2010. V. 48, No 15. P. 1685–1718. <https://doi.org/10.1002/polb.22037>.
9. BASF. Ultrason® Specialty polymers for high-performance products. URL: https://plastics-rubber.basf.com/global/en/performance_polymers/products/ultrason/ultrasonproductselector.
10. SYENSQO. Radel® PPSU for Healthcare. URL: <https://www.syensqo.com/en/brands/radel-ppsu/healthcare>.
11. Raeva A., Matveev D., Anokhina T., Zhansitov A.A., Khashirova S., Volkov V., Borisov I. Increasing the permeability of polyphenylene sulfone hollow fiber ultrafiltration membranes by switching the polymer end groups // *Polymers*. 2025. V. 17, No 1. Art. 53. <https://doi.org/10.3390/polym17010053>.
12. Wojciechowski C., Wasyleczko M., Lewińska D., Chwojnowski A. A comprehensive review of hollow-fiber membrane fabrication methods across biomedical, biotechnological, and environmental domains // *Molecules*. 2024. V. 29, No 11. Art. 2637. <https://doi.org/10.3390/molecules29112637>.
13. Matveev D.N., Raeva A.Yu., Anokhina T.S., Borisov I.L. Creation of ultrafiltration hollow fiber membranes based on polyphenylene sulfone with different chemical structure of end groups // *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2024. V. 97, No 6. P. 1560–1566. <https://doi.org/10.1007/s10891-024-03031-9>.
14. ГОСТ 11262–2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2018. 19 с.
15. Matveev D., Raeva A., Borisov I., Vasilevsky V., Matveeva Y., Zhansitov A., Khashirova S., Volkov V. Effect of molecular weight and chemical structure of terminal groups on the properties of porous hollow fiber polysulfone membranes // *Membranes*. 2023. V. 13, No 4. Art. 412. <https://doi.org/10.3390/membranes13040412>.

References

1. *IHP-IX: Strategic Plan of the Intergovernmental Hydrological Programme: Science for a Water Secure World in a Changing Environment, Ninth Phase 2022-2029*. Paris, UNESCO/Div. Water Sci., 2022. 51 p.
2. Skoczko I. Energy efficiency analysis of water treatment plants: Current status and future trends. *Energies*, 2025, vol. 18, no. 5, art. 1086. <https://doi.org/10.3390/en18051086>.
3. Dharani L., Umapriya R., Rohan J., Surendran G., Gokila M., Infanta M.J. Application of membrane technology for wastewater treatment. In: Shah M.P. (Ed.) *Microbial Approach of Biofiltration in Industrial Wastewater Treatment for the Sustainability of Environment*. Ser.: Environmental Science and Engineering. Cham, Springer, 2025, pp. 37–57. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48150-5_3.
4. Regula C., Carretier E., Wyart Y., Gésan-Guizieu G., Vincent A., Boudot D., Moulin P. Chemical cleaning/disinfection and ageing of organic UF membranes: A review. *Water Res.*, 2014, vol. 56, pp. 325–365. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.02.050>.
5. Wagner J. *Membrane Filtration Handbook: Practical Tips and Hints*. Minnetonka, MN, Osmonics, 2001. 129 p.
6. Dai Z., Ronholm J., Tian Y., Sethi B., Cao X. Sterilization techniques for biodegradable scaffolds in tissue engineering applications. *J. Tissue Eng.*, 2016, vol. 7, art. 2041731416648810. <https://doi.org/10.1177/2041731416648810>.

7. Kaur J. Chapter 24 – Advances in biomedical waste management technologies. In: Singh P., Verma P., Singh R., Ahamad A. Batalhão A.C.s. (Eds.) *Waste Management and Resource Recycling in the Developing World*. Amsterdam, Elsevier, 2023, pp. 543–573. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90463-6.00024-5>.
8. Geise G.M., Lee H.-S., Miller D.J., Freeman B.D., McGrath J.E., Paul D.R. Water purification by membranes: The role of polymer science. *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, 2010, vol. 48, no. 15, pp. 1685–1718. <https://doi.org/10.1002/polb.22037>.
9. BASF. Ultrason® Specialty polymers for high-performance products. URL: https://plastics-rubber.basf.com/global/en/performance_polymers/products/ultrason/ultrasonproductselector.
10. SYENSQO. Radel® PPSU for Healthcare. URL: <https://www.syensqo.com/en/brands/radel-ppsu/healthcare>.
11. Raeva A., Matveev D., Anokhina T., Zhansitov A.A., Khashirova S., Volkov V., Borisov I. Increasing the permeability of polyphenylene sulfone hollow fiber ultrafiltration membranes by switching the polymer end groups. *Polymers*, 2025, vol. 17, no. 1, art. 53. <https://doi.org/10.3390/polym17010053>.
12. Wojciechowski C., Wasyleczko M., Lewińska D., Chwojnowski A. A comprehensive review of hollow-fiber membrane fabrication methods across biomedical, biotechnological, and environmental domains. *Molecules*, 2024, vol. 29, no. 11, art. 2637. <https://doi.org/10.3390/molecules29112637>.
13. Matveev D.N., Raeva A.Yu., Anokhina T.S., Borisov I.L. Creation of ultrafiltration hollow fiber membranes based on polyphenylene sulfone with different chemical structure of end groups. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2024, vol. 97, no. 6, pp. 1560–1566. <https://doi.org/10.1007/s10891-024-03031-9>.
14. State Standard 11262–2017. Plastics. Tensile test method. Moscow, Standartinform, 2018. 19 p. (In Russian)
15. Matveev D., Raeva A., Borisov I., Vasilevsky V., Matveeva Y., Zhansitov A., Khashirova S., Volkov V. Effect of molecular weight and chemical structure of terminal groups on the properties of porous hollow fiber polysulfone membranes. *Membranes*, 2023, vol. 13, no. 4, art. 412. <https://doi.org/10.3390/membranes13040412>.

Информация об авторах

Алиса Юрьевна Раева, младший научный сотрудник Центра прогрессивных материалов и аддитивных технологий, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова; младший научный сотрудник лаборатории полимерных мембран, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: raevaau@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7613-7156>

Дмитрий Николаевич Матвеев, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории полимерных мембран, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: dmatveev@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8549-0886>

Татьяна Сергеевна Анохина, кандидат химических наук, руководитель лаборатории полимерных мембран, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

E-mail: tsanokhina@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6154-3709>

Азамат Асланович Жанситов, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Центра прогрессивных материалов и аддитивных технологий, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

E-mail: azamat-z@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0815-6638>

Светлана Юрьевна Хаширова, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН, проректор по НИР, Центр прогрессивных материалов и аддитивных технологий, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

E-mail: sveta_daova@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7210-1252>

Владимир Васильевич Волков, доктор химических наук, профессор, профессор РАН, советник директора, главный научный сотрудник лаборатории полимерных мембран, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук; главный научный сотрудник Центра прогрессивных материалов и аддитивных технологий, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

E-mail: vvvolkov@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0815-6638>

Илья Леонидович Борисов, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории полимерных мембран, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук; ведущий научный сотрудник Центра прогрессивных материалов и аддитивных технологий, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

E-mail: Boril@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0406-6280>

Author Information

Alisa Yu. Raeva, Junior Researcher, Center for Progressive Materials and Additive Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; Junior Researcher, Laboratory of Polymeric Membranes, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: raevaau@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7613-7156>

Dmitry N. Matveev, Cand. Sci. (Chemistry), Researcher, Laboratory of Polymeric Membranes, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: dmatveev@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8549-0886>

Tatyana S. Anokhina, Cand. Sci. (Chemistry), Head of Laboratory of Polymeric Membranes, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences

E-mail: tsanokhina@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6154-3709>

Azamat A. Zhansitov, Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher, Center for Progressive Materials and Additive Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

E-mail: azamat-z@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0815-6638>

Svetlana Yu. Khashirova, Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Vice-Rector for Research, Center for Progressive Materials and Additive Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

E-mail: sveta_daova@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7210-1252>

Vladimir V. Volkov, Dr. Sci. (Chemistry), Professor of Russian Academy of Sciences, Advisor to the Director, Chief Researcher, Laboratory of Polymeric Membranes, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences; Chief Researcher, Center for Progressive Materials and Additive Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

E-mail: vvvolkov@ips.ac.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0815-6638>

И'ya L. Borisov, Dr. Sci. (Chemistry), Leading Researcher, Laboratory of Polymeric Membranes, A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, Russian Academy of Sciences; Leading Researcher, Center for Progressive Materials and Additive Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

E-mail: *Boril@ips.ac.ru*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0406-6280>

Поступила в редакцию 20.06.2025

Принята к публикации 13.08.2025

Received June 20, 2025

Accepted August 13, 2025