

КОМБИНИРОВАННАЯ ПЛАЗМА В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ ВОЛОКОН

COMBINED PLASMA IN THE PROCESS OF FIBERS MODIFICATION

Хтет Ко Ко Зау¹, / htetkokozaaw536@gmail.com (ORCID: 0000-0002-8552-4633)

Т.М.Васильева¹ / tmvasilieva@gmail.com(ORCID: 0000-0001-6103-6195)

Аунг Чжо У¹ / roselatt1500@gmail.com (ORCID:0000-0003-4799-3284)

Йе Хлаинг Тун¹ / yehlainghtun@phystech.edu(ORCID:0000-0002-3559-9717)

М.Н.Васильев¹ / vasilev.mn@mipt.ru

М.И.Виноградов² / m.i.vinogradov1989@gmail.com

И.С.Макаров² / makarov@ips.ac.ru(ORCID:0000-0001-8183-4215)

Htet Ko Ko Zaw, T.M.Vasilieva, Aung Kyaw Oo, Ye Hlaing Htun, M.N.Vasiliev, M.I.Vinogradov, I.S.Makarov

¹Московский физико-технический институт Московская обл., г. Долгопрудный,

²ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (ИНХС РАН), г. Москва

Представлены конструкция реакторов и технологические подходы для обработки тонких целлюлозных, углеродных и базальтовых волокон в плазме форвакуумного давления с целью модификации их поверхности и улучшения функциональных свойств.

Reactors design, operation and control used to process thin fibers in plasmas of forevacuum pressure are presented. Cellulose, carbon and basalt fibers were treated to modify their surface and to improve their functional properties.

Ключевые слова: углеродные и базальтовые волокна, низкотемпературная плазма, электронный пучок, ВЧ-разряд, пучково-плазменная технология, плазмохимический реактор, нанесение кремниевых нанослоев, плазмохимическая функционализация.

Key words: carbon and basalt fibers, low temperature plasma, electron beam, RF discharge, beam-plasma technology, plasma chemical reactor, deposition of silicon nanolayers, plasma chemical functionalization.

ВВЕДЕНИЕ

Нетрадиционные методы модификации тонких волокон углерода, полимеров или биополимеров являются частым предметом современных фундаментальных и прикладных исследований. Так, облучение электронными пучками (ЭП) и воздействие низкотемпературной плазмы (НТП) рассматриваются как эффективные способы подготовки волокон для дальнейшего применения в промышленности [1-7], аэрокосмических [8], субмикронных технологиях [9], оптике [10], биологии и медицине [11-16]. С помощью этих методов были обработаны и функционализированы различные органические и неорганические волокнистые материалы, что позволило улучшить свойства их поверхности или придать ей новые ценные характеристики [17-22], которые рассмотрены во многих работах [3, 33-36, 46-51].

Быстрые электроны способны разрушать структуру волокна [23-25] или образовывать поперечные связи в молекулах полимера [26-29], тогда как относительно мягкое действие частиц НТП обычно влияет только на поверхностный слой волокна [13, 17, 30-32]. В НТП возможно активировать поверхность волокна, изменять его гидрофильных/гидрофобных свойства и формировать химические группировки, способные эффективно связывать молекулы органических веществ или биологически активные макромолекулы. Таким образом, НТП позволяет подготовить волокна для

использования в качестве основы для армированных композитов и высокоэффективных материалов [26, 33-36], селективных сорбентов [37-39], биоактивных субстратов или матриц [40-45].

Имеющиеся данные показывают, что электронные пучки и НТП активируют в волокнах принципиально разные реакции, объединение которых открывает новые возможности для получения интегральных (возможно синергетических) эффектов. В наших предыдущих работах описано успешное использование комбинированной НТП, возбуждаемой совместным действием нерелятивистского ЭП и ВЧ-разряда (иногда называемой гибридной), для обработки пленок и порошков природных полимеров [52, 53].

Пучково-плазменные системы, описанные в настоящей статье, были специально разработаны для экспериментов с волокнами и тканями. Установка была оснащена новой системой электродов и системой сканирования пучка, выполняющей обработку волокна в различных вариантах:

- в неподвижных плазменных облаках и в плазменных потоках;
- в объемах плазмы, контролируемых электронным пучком (форма, размеры и состав реакционного объема контролируются электронным пучком);
- в плазме с различной зависимостью между электронным пучком и мощностью газового разряда.

Таким образом, многофункциональная экспериментальная установка может рассматриваться в качестве прототипа реактора, пригодного для динамической пучково-плазменной обработки волокон при различных температурах (от комнатной до 1000 К) в газовых смесях сложного состава в неравновесных условиях.

Следует подчеркнуть важную особенность рассматриваемого реактора: для обработки материалов используются ЭП относительно низкой энергии (<50 кэВ), и поэтому нежелательные радиационные повреждения волокон сводятся к минимуму. С другой стороны, давление газа в зоне реакции, поддерживаемой пучком, может быть увеличено до значений ~ 10 Торр, при которых обычные ВЧ-разряды не воспламеняются или нестабильны и контрагируют. В результате повышается эффективность обработки материала за счет увеличения концентрации химически активных частиц по сравнению с газоразрядной плазмой, при этом в качестве плазмообразующих сред могут быть использованы практически любые чистые газы и газообразные смеси, выбор которых зависит от желаемого эффекта модификации.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения комплексной целлюлозной нити, использовали целлюлозу со степенью полимеризации 720, содержанием влаги ~8%, массовым содержанием в сухом остатке альфа-целлюлозы ~ 92% и размером частиц <250 мкм. В качестве прямого растворителя целлюлозы использовали N-метилморфолин-N-оксид (Domochem, Китай) с содержанием воды ~8-10%. Термоокислительную деструкцию подавляли введением в систему 0,5% пропилагалата (Sigma-Aldrich, США). Целлюлозные волокна формовали из 12% растворов, которые готовили по методике [55], сухо-мокрым способом формования. Структуру исходных и подвергшихся обработке плазмой волокон исследовали методом рентгеновской дифрактометрии на установке Rigaku Rotaflex RU-200 (Rigaku, США). Также выполнялся термогравиметрический анализ и исследование эластичности исходных и обработанных волокон.

Углеродные и базальтовые волокна диаметром 1-5 мкм были поставлены для экспериментов АО «НИИГрафит» (г. Москва, Россия).

КОНСТРУКЦИЯ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РЕАКТОРА И ПРОЦЕДУРА ОБРАБОТКИ ВОЛОКНА

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. ВЧ-разряд (13,56 МГц) возбуждали вокруг цилиндрического электрода (5) диаметром 6 мм, изготовленного из пористой металлической (вольфрамовой, титановой, медной или

нержавеющей стали) трубки, размещенной в центральной зоне реакционной камеры (7) объемом 500 мм³. Реакционная камера заполнялась либо буферным газом (аргон), либо одним из газов-реагентов до давления $P_m = 1-10$ Торр. Второй газ-реагент продували через поры ВЧ-электрода. В экспериментах использовали благородные газы, кислород, газообразные углеводороды (СН₄), а также кислородсодержащие смеси. Для нанесения кремниевых нанослоев на углеродное и базальтовое волокно через центральный пористый электрод плазмохимического реактора продували моносилан (SiH₄) или тетрахлорид кремния (SiCl₄). Волокна для обработки (10) закреплялись на электроде.

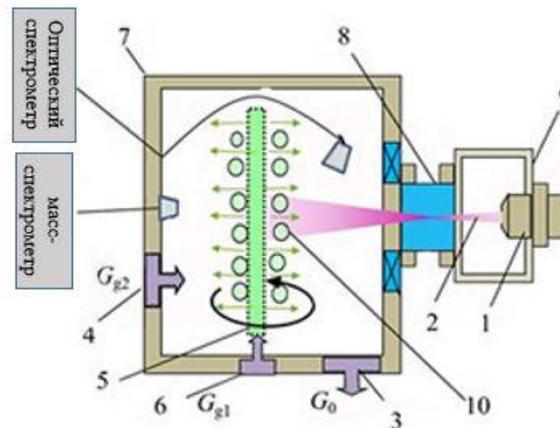


Рис.1. Схема плазмохимического реактора: 1 - электронная пушка, 2 - ЭП, 3 – подключение к вакуумному насосу (G_0), 4 - основной газовый натекатель (расход G_{g2}), 5 – ВЧ-электрод, 6 – ВЧ-вход, совмещенный с дополнительной подачей газа (расход G_{g1}), 7 - рабочая камера, 8 – выводное окно, 9 - высоковакуумная камера, 10 - обрабатываемое волокно

Непрерывный ЭП (2) формировался в высоковакуумной камере (9) электронной пушкой (1), а затем вводился в реакционную камеру через специальное газодинамическое окно (8). ЭП мог сканироваться вдоль ВЧ-электрода, чтобы контролировать локализацию плазменного облака на электроде и частично управлять составом частиц плазмы рядом с ним. Таким образом, на волокна воздействовала как ВЧ-плазма, так и плазма, возбуждаемая быстрыми электронами. Электрод вращался, чтобы избежать появления теневых зон, где волокно не подвергается воздействию ЭП.

При соответствующем выборе значения энергии ($E = 25-40$ кэВ) и тока ($I = 1-100$ мА) ЭП температура обработки волокна T может изменяться в широких пределах 300-1200 К.

Реактор был оснащен диагностическим комплексом для контроля параметров плазмы и автоматического поддержания заданных режимов плазмохимической обработки [52, 53, 56], в который вошли оптические спектрометры УФ- и ИК-диапазона (Avaspec-2048-2 и Avaspec-NIR256-1,7 (Avantes, Нидерланды)), масс-спектрометр HALO 201-RC (Hiden Analytical, Великобритания) и оптический пирометр Optris LS (Optris GmbH, Германия), используемый для дистанционного контроля температуры ВЧ-электрода и, собственно, температуры волокна T .

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показано влияние электронного пучка на форму и расположение объема плазмы при достаточно низких (рис. 2а) и более высоких (рис. 2б) давлениях плазмообразующей среды. В первом случае пучок практически не рассеивается и, будучи

тонким, локально влияет на плазму газового разряда в очень узкой зоне. При более высоких давлениях столкновения быстрых электронов с молекулами газа вызывают интенсивное рассеяние пучка, и зона взаимодействия газоразрядной и электронно-пучковой плазмы расширяется. Однако в последнем случае плазма существует только в зоне, облучаемой ЭП, а на ВЧ-электроде появляется темная зона, где его не касается даже рассеянный ЭП. В целом результаты испытаний пучково-плазменного реактора показывают, что:

- комбинированная плазма может генерироваться вблизи достаточно длинных ВЧ-электродов и, следовательно, одновременно может быть обработано большое количество волокон (комплексная нить);
- электронно-пучковое воздействие увеличивает давление плазмообразующего газа, при котором реактор работает стабильно; в результате продолжительность обработки может быть сокращена из-за увеличения концентраций химически активных частиц;
- сканирование ЭП и вращение ВЧ-электрода гарантируют равномерность обработки волокон;
- в исследуемом реакторе возможна обработка разных типов волокон, но для получения желаемого эффекта обработки состав плазмообразующей среды, мощность ВЧ-разряда и параметры ЭП выбираются индивидуально для исследуемых образцов.

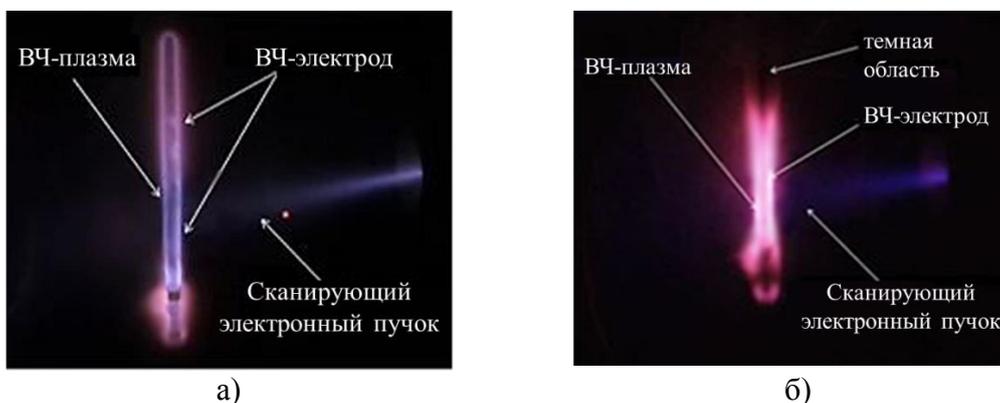


Рис. 2. Кислородная комбинированная плазма вблизи цилиндрического ВЧ-электрода, облучаемого сканированным электронным пучком ($E = 30$ кэВ, $I = 5$ мА) при температуре $T = 320$ К: (а) $P_m = 1$ Торр; (б) $P_m = 5$ Торр

Реактор был испытан для проведения трех перспективных технологий:

- повышение смачиваемости полимерных волокон для производства композиционных материалов;
- модификация целлюлозных прекурсоров для дальнейшего получения углеродных материалов на их основе;
- улучшение механических характеристик, огнестойкости углеродных и базальтовых волокон и активации их поверхности для дальнейшего покрытия другими материалами.

Сравнение свойств исходных целлюлозных волокон, и образцов, обработанных электронным пучком и в комбинированной плазме, позволило установить, что в комбинированной плазме удастся получить волокна, эластичность которых практически не отличается от исходных. Рентгенографический анализ показал, что дифрактограммы для исходных и обработанных плазмой волокон практически идентичны. Угловое положение пиков для волокон до и после обработки характерны для полиморфа целлюлозы II и находятся в области $2\theta \sim 12,3^\circ$, $\sim 20,5^\circ$ и $\sim 21,9^\circ$ [58]. При этом полученные при плазменной обработке волокна устойчивы к высокотемпературным обработкам (до 1500К). В то же время в результате воздействия быстрых электронов, сопровождающегося

сильной дегидратацией и деполимеризацией материала, прочность волокна и его устойчивость к термической деструкции снижается. Таким образом, модификация целлюлозных волокон в комбинированной НТП может рассматриваться как эффективный метод дополнительной обработки прекурсоров углеродных волокон для получения удовлетворительных механических свойств конечного продукта.

Эксперименты по прямому нанесению кремниевых нанослоев на углеродное и базальтовое волокно показали, что эти слои могут увеличить продолжительность горения материала в пламени пропановой горелки в 1,2-2,0 раза. Лучшие результаты (повышение огнестойкости примерно в два раза) были получены при послойном или комбинированном осаждении Si и SiC на базальтовых волокнах.

ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящее исследование было сконцентрировано на экспериментах с возобновляемым и широко доступным природным сырьем, чтобы доказать преимущества пучково-плазменных технологий. Известно, что эти технологии безопасны для окружающей среды, поскольку форвакуумные реакторы такого типа обычно не производят токсичных газовых выбросов и/или опасных жидких отходов [59]. Другими очень важными особенностями, определяющими преимущества реакторов, являются:

1) Возможность использования в качестве плазмообразующих сред практически любых газов, паров и их смесей. Это значительно расширяет спектр возможных плазмохимических процессов для достижения желаемого результата обработки. Замена плазмообразующих газов или введение дополнительных реагентов позволяют проводить многоступенчатые процессы.

2) Высокие концентрации химически активных частиц, которые могут быть получены даже при низких (~ 300 К) температурах. Обычно не требуется полный нагрев реакционного объема, а обрабатываемое волокно, при необходимости, может нагреваться отдельно. Это экономит энергозатраты и упрощает конструкцию реакционной камеры и вспомогательных подсистем реактора.

3) Эффективность преобразования электроэнергии в процессах генерирования неравновесной плазмы значительно выше, чем в обычных реакторах, работающих в условиях термодинамического равновесия.

4) Контролируемое функционирование пучково-плазменных реакторов (параметры ЭП задают основные характеристики генерируемой плазмы и контролируют локализацию реакционной зоны).

ВЫВОДЫ

Результаты исследования показывают, что пучково-плазменные технологии являются перспективными для эффективной, ресурсосберегающей и экологически чистой обработки различных волокон (природных биополимеров, углеродных, базальтов и др.) с целью улучшения их функциональных свойств и получения ценных конечных или промежуточных продуктов. Предложенные подходы можно рассматривать как конкурентоспособную альтернативу традиционным методам модификации волокон.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантами РФФИ 20-02-00501_а и 19-38-90009.

Получение образцов выполнено в рамках госзадания ИНХС РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Effect of electron beam irradiation on the mechanical properties of buriti fiber. A. Barbosa, L. Costa, T. Portela, E. Moura, N. Del Mastro, K.G. Satyanarayana, and S. Monteiro. // *Matéria* (Rio de Janeiro), 2012, 1135 p.

2. Electron Beam Processing: a New Business and a New Industry. A.J. Stirling. // Proc. Eur. Particle Accelerator Conference, 1996, 272 p.
3. Materials: Introduction and Applications. R. Jelil. // Journal of Materials Science, 2015, 5913 p.
4. Hybrid Ship Hulls: Engineering Design Rationales. A.L. Buxton, and B.G.I. Dance. // ASM International, ISEC Congress, 2005, 9049 p.
5. Physico-Chemical Aspects of Textile Coloration. S.M. Burkinshaw. // John Wiley and Sons Ltd., UK, 2014, 197 p.
6. Applied Mechanics and Materials. N.Z. Shu, H.Y. Li, F.X. Wang, and Y.S. Dai. // 2014, 490–491 p.
7. Multifunctional fabrics of carbon nanotube fibers. T. Su, Y. Han, H. Liu, L. Li, Z. Zhang, and Z. Li. // Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2019, 14 p.
8. Investigation on the effect of process parameters in atmospheric pressure plasma treatment on carbon fibre reinforced polymer surfaces for bonding. M. Yoozbashizadeh, M. Chartosias, C. Victorino, and D. Decker. // Materials and Manufacturing Processes, 2019, 669 p.
9. Atmospheric Dry Hydrogen Plasma Reduction of Inkjet-Printed Flexible Graphene Oxide Electrodes. V. Medvecká, D. Kovacik, A. Zahoranova, M. Cernak. // Proc. 2nd World Congress on Recent Advances in Nanotechnology, 2017, 131 p.
10. Nanotrimer enhanced optical fiber tips implemented by electron beam lithography. N. Wang, M. Zeisberger, U. Hubner, and M.A. Schmidt. // Optical Materials Express, 2018, 2246 p.
11. Combination of low-temperature plasma processes in the design of a novel ampicillin-loaded surgical mesh for hernia repair. C. Labay, J. Canal, M. Modic, U. Cvelbar, M. Quiles, M. Armengol, M. Arbos, F. Gil, and C. Canal. // 10th World Biomaterials Congress, 2016, doi: 10.3389/conf.FBIOE.2016.01.00954.
12. Regulating the Antibiotic drug release from β -tricalcium phosphate ceramics by atmospheric plasma surface engineering. C. Labay, J.M. Canal, M. Modic, U. Cvelbar, M. Quiles, M. Armengol, M.A. Arbos, F.J. Gil, and C. Canal. // Biomaterials – Journal, 2015, 132 p.
13. Future trends in plasma science. K-D. Weltmann, J.F. Kolb, M. Holub, D. Uhrlandt, M. Šimek, K. Ostrikov, S. Hamaguchi, U. Cvelbar, B. Locke, A. Fridman, P. Favia, K. Becker. // Plasma Processes and Polymers. 2019, 16 p.
14. Influence of low-temperature atmospheric pressure plasma treatment on the surface treatment of fiber post. T. Yamamura, T. Okawa, Y. Ito, T. Fujii, and M. Tanaka. // Journal of Osaka Dental University, 2019, 39 p.
15. Effect of low-temperature plasma treatment of electrospun polycaprolactone fibrous scaffolds on calcium carbonate mineralisation. A.A. Ivanova, D.S. Syromotina, S.N. Shkarina, R. Shkarin, A. Cecilia, V. Weinhardt, T. Baumbach, M.S. Saveleva, D.A. Gorin, T.E.L. Douglas, B.V. Parakhonskiy, A.G. Skirtach, P. Cools, N. De Geyter, R. Morent, C. Oehr, M.A. Surmeneva, and R. A. Surmenev. // RSC Advances - Royal Society of Chemistry, 2018, 39106 p.
16. Effect of Low-Temperature Plasma Jet on Thermal Stability and Physical Structure of Type I Collagen. V. Samouillan, N. Merbahi, M. Yousfi, J-P. Gardou, F. Delaunay, J. Dandurand, and C. Lacabanne. // IEEE Transac. Plasma Sci, 2012, 1688 p.
17. Surface Functional Poly(lactic Acid) Electrospun Nanofibers for Biosensor Applications. L.M. Shepherd, and M.W. Frey. // Fibers, 2018, doi:10.3390/fib6030061.
18. The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology. A. Haji, S.S. Qavamnia, and F. K. Bizhaem. // Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, 2014, 602 p.
19. Comprehensive stabilization mechanism of electron-beam irradiated polyacrylonitrile fibers to shorten the conventional thermal treatment. S. Park, S.H. Yoo, H.R. Kang, S.M. Jo, H-I. Joh, and S. Lee. // International Journal of Scientific Reports, 2016, 27330 p.
20. Recent advances in carbon nanomaterials derived from biomass. C.Q. Li, H.B. Dong, and W.W. Zhang. // Sur. Eng, 2018, 870 p.

21. Nanostructured Materials for Next-Generation Energy Storage and Conversion. J. Yang, Y. Liu, J. Liu, Z. Shen, J. Liang, and X. Wang. // *Materials*, 2018, 1270 p.
22. Study on Polycarbosilane Fibers Cured by Thermal Process and Electron Beam Irradiation. J. Setiawan, Pranjono, R. Saptaaji, S. Poertadji, and Sigit. // *7th International Conf. on Physics and Its Applications*, 2014, 127 p.
23. Radiation chemistry of spurs in polymers. Z.P. Zagorski. // *Advances in radiation chemistry of polymers*, International Atomic Energy Agency, 2004, 21 pages.
24. Effect of the utilization of electron beam irradiation on the reactivity of bamboo dissolving pulp. Q-Y. Chen, X-J. Ma, J-G. Li, Q-X. Miao, and L-L. Huang. // *BioResources*, 2017, 6251 p.
25. Photocured Materials. G. Burillo, R. Clough, T. Czvikovszky, O. Güven, A. Moel, W. Liu, A. Singh, J. Yang, and T. Zaharescu. // *Rad. Phys. Chem*, 2002, 41 p.
26. Mechanical properties and water absorption behavior of hybridized kenaf/pineapple leaf fibre-reinforced high-density polyethylene composite. I.S. Aji, E.S. Zainudin, M.D. Khairul, K. Abdan, and S.M. Sapuan. // *J. Reinf. Plast. Compos*, 2012, 1827 p.
27. Applications of Particle and Laser Beams in Material Technology. Ed. by P. Misaelides. // Springer Science and Business Media Dordrecht, Germany, Heidelberg, 1995, 557 p.
28. The effect of high-energy electron beam on drawn and undrawn high density polyethylene fibers. J. Morshedian, Y. Jahani, F. Sharbafian and F.S. Zarei. // *Polyolefins Journal*, 2015, 109 p.
29. Radiation Processing of Polymer Materials and its Industrial Applications. K. Makuuchi, and S. Cheng. // Wiley, Hoboken, N.J., 2011.
30. Exploiting Plasma Exposed, Natural Surface Nanostructures in Ramie Fibers for Polymer Composite Applications. S.F. Hamad, N. Stehling, S.A. Hayes, J.P. Foreman, and C. Rodenburg. // *Materials*, 2019, 1631 p.
31. Nonthermal Plasma Chemistry and Physics. C. Oehr. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2003, 40 p.
32. A Handbook of Nuclear Applications in Humans' Lives. C. Borcia, G. Borcia, and N. Dumitrascu. // *Romanian Journal of Physics RJP*, 2011, 224 p.
33. Radiation Processing of Polymer Materials and Its Industrial Applications. T. Czvikovszky. // *Radiation Physics and Chemistry*, 1996, 425 p.
34. High energy electron irradiation effects on polystyrene films. R.C. Subhendu, S. Sabharwal, and K.S.S. Sarma. // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2012, 1426 pages.
35. Exploring the Effect of Electron Beam Irradiation on the Properties of Some EPDM-Flax Fiber Composites. M.D. Stelescu, A. Airinei, E. Manaila, N. Fifere, G. Craciun, C. Varganici, and F. Doroftei. // *Polymer Composites*, 2019, 315 p.
36. Matéria (Rio de Janeiro). P.Y. Inamura, K.C. Shimazaki, M.A.R. de Ricardo, M.E.A. de Barretos, and N.L. del Mastro. // 2010, 380 p.
37. Green and Efficient Synthesis of an Adsorbent Fiber by Plasma-induced Grafting of Glycidyl Methacrylate and Its Cd(II) Adsorption Performance. H. Chen, M. Guo, X. Yao, K. Dong, Z. Lian, W. Wei, and Z. Luo. // *Fibers and Polymers*, 2018, 722 p.
38. Mip Synthesis, Characteristics and Analytical Application. M. Ceglowski, M. Smoluch, E. Reszke, J. Silberring, and G. Schroeder. // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2017, 3393 p.
39. Amino-Fe₃O₄-functionalized multi-layered graphene oxide as an ecofriendly and highly effective nanoscavenger of the reactive drimaren red. T.J.M. Fraga, M.N. Carvalho, N. Marilda, M.G. Ghislandi, S. Motta, and A. da Maurício. // *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2019, 36 p.
40. Visible light-driven organic photochemical synthesis in China. Y. Zhao, H. Zhao, D. Liu, Y. Zhang, M. Qian, P. Jiang, and X. Liang. // *Central China Normal University*, 2015, 210 p.

41. Applications of Plasma Technologies to Material Processing. F. Sharifi, S. Irani, M. Zandi, M. Soleimani, and S.M. Atyabi. // *Progress in Biomaterials*, 2016, 213 p.
42. Chitosan Based Regenerated Cellulose Fibers Functionalized with Plasma and Ultrasound. U.V. Brodnjak, A. Jesih, and D. Gregor-Svetec. // *Coatings*, 2018, 133 p.
43. Interface Oral Health Science 2014: Innovative Research on Biosis-Abiosis. W. Liu, Q. Cai, F. Zhang, Y. Wei, X. Zhang, Y. Wang, X. Deng, and X. Deng. // *J. Bioact. Compat. Polym.*, 2013, 453 p.
44. Influence of 6 MeV Electron Beam Irradiation on the Structural and Thermal Properties of Fibers of *Luffa cylindrica*. S. Patra, K. Mohanta, and C. Parida. // *International Journal of Modern Physics B*, 2019, 1950305 p.
45. In vivo analysis of vascularization and biocompatibility of electrospun polycaprolactone fibre mats in the rat femur chamber. D. de Cassan, A.L. Hoheisel, B. Glasmacher, and H. Menzel. // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2019, 42 p.
46. Electron beam irradiation-enhanced wettability of carbon fibers. B-H. Kim, D.H. Lee, K.S. Yang, B-C. Lee, Y.A. Kim, and M. Endo. // *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2011, 119 p.
47. Influence of oxygen plasma treatment parameters on the properties of carbon fiber. M.B. Borooj, A.M. Shoushtari, E.N. Sabet, and A. Haji. // *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2016, 2372 p.
48. Design Rules for Enhanced Interfacial Shear Response in Functionalized Carbon Fiber Epoxy Composites. L. Szabó, S. Imanishi, F. Tetsuo, M. Nishio, D. Hirose, T. Tsuchi, K. Taki, K. Ninomiya, and K. Takahashi. // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 386 p.
49. Future trends in plasma science. M. Šimek, M. Černák, O. Kylián, R. Foest, D. Hegemann, R. Martini. // *Plasma Processes and Polymers*, 2019, 1700250 p.
50. Plasma modified textiles for biomedical applications. Ed. by P.A. Serra. // *Advances in Bioengineering*, Intech, Croatia, 2015, 117 p.
51. Nanomaterials-Based Coatings: Fundamentals and Applications. M. Mirjalili, and L. Karimi. // *Journal of The Textile Institute*, 2013, 98 p.
52. Electron-Beam Plasma for Biomass Modification. T.M. Vasilieva, I.K. Naumova, O.V. Galkina, E.V. Udoratina, L.A. Kuvschinova, M.N. Vasiliev, Khin Maung Htay, and Htet Ko Ko Zaw. // *IEEE Transac. Plasma Sci*, 2020, doi:10.1109/TPS.2020.2980200.
53. Hybrid plasma chemical reactors for bio-polymers processing. M. Vasiliev, T. Vasilieva, and Aung Miat Hein. // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 335202 p.
54. Bacterial Cellulose Synthesized by *Gluconacetobacter hansenii* for Medical Applications. T.I. Gromovykh, V.S. Sadykova, S.V. Lutchenko, A.S. Dmitrenok, N.B. Feldman, T.N. Danilchuk, and V.V. Kashirin. // *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2017, 60 p.
55. Composite Fibers From Cellulose Solutions with Additives of Bis (Trimethylsilyl) Acetylene and Alkoxysilanes: Rheology, Structure and Properties. I.S. Makarov, L.K. Golova, M.I. Vinogradov, I.S. Levin, T.I. Gromovykh, N.A. Arkharova, and V.G. Kulichikhin. // *Fibre Chem*, 2019, 175 p.
56. Hybrid Plasma – Prospects for Application in Medicine and Biology. T.M. Vasilieva, M.N. Vasiliev, V.V. Garaeva, I.S. Zlobin, Zaw Ye Mint, Khin Maung Htau, Htet Wai Yan Kyaw, and Htet Ko Ko Zaw. // *Russian Physics Journal*, 2020, 2092 p.
57. Chitin and Cellulose Processing in Low-Temperature Electron Beam Plasma. T. Vasilieva, D. Chuhchin, S. Lopatin, V. Varlamov, A. Sigarev, and M. Vasiliev. // *Molecules*, 2017, 1908 p.
58. Biopolymers from Renewable Resources. Ed. by D.L. Kaplan. // *Springer Science and Business Media*, Dordrecht, Germany, Heidelberg, 2013, chapter 3.
59. Applications of electron-beam plasmas in plasmachemistry. M. Vasiliev, and T. Vasilieva. // *Encyclopedia of Plasma Technology*, Taylor & Francis Inc., USA, 2016, 152 p.