

Зависимость свойств электродов суперконденсаторов на основе композитов углеродная ткань – полианилин от концентрации анилина в растворе при синтезе

© Шафигуллина¹⁺ Кристина Эдуардовна, Кречетов¹ Илья Сергеевич, Болотников¹ Антон Александрович, Берестов¹ Валентин Викторович, Лепкова¹ Татьяна Львовна, Зырянова² Златоцвета Евгеньевна, Стаханова^{2*} Светлана Владленовна

¹ Кафедра физической химии. Институт новых материалов. Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Ленинский пр-т, д.4, стр.1. г. Москва, 119049. Россия.

E-mail: k.shafigullina@misis.ru

² Кафедра аналитической химии. Факультет естественных наук. Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева. Миусская пл., д.9, стр.1. г. Москва, 125047. Россия.

*Ведущий направление; +Поддерживающий переписку

Ключевые слова: полианилин, углеродная ткань, композитные электроды, суперконденсатор, двойнослойная ёмкость, псевдоёмкость.

Аннотация

В данной работе были изготовлены композитные материалы для электродов суперконденсаторов на основе активированной углеродной ткани, модифицированной проводящим полимером полианилином. Полианилин был получен методом химической окислительной полимеризации с содержанием анилина в растворе для полимеризации в диапазоне от 0.1 до 1 М. На основании результатов исследования выявлена корреляция между содержанием анилина в растворе для полимеризации, морфологией и электрохимическими свойствами композитов. При исследовании поверхности композитов методом растровой электронной микроскопии установлено, что морфология полимерного покрытия, существенно зависит от концентрации мономера. При низком содержании полианилина в композитах (от 0.1 до 0.25 М) на поверхности ткани формируются отдельные локализованные участки полимера, на срезах волокон в порах наблюдаются точечные включения полимерного материала. При высоких концентрациях 0.5-1 М наблюдается значительное увеличение размеров полимерных образований и их количества на поверхности волокон. Результаты исследования кинетики впитывания демонстрируют резкое снижение скорости впитывания тканью растворов, содержащих полианилин, по мере увеличения концентрации полимера. Электрохимические характеристики имеют выраженную немонотонную зависимость от содержания в растворе для полимеризации анилина. Максимальная удельная ёмкость 4.40 Ф/см² была достигнута при содержании анилина 0.25 М, при этом анализ данного композита по методу Тразатти позволил выявить вклад двойного электрического слоя – 69% и псевдоёмкости 31%. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к значительному росту сопротивления (до 2.88 Ом для 0.5 М и до 6.17 Ом для 1 М) и снижению ёмкостных характеристик из-за формирования полианилина в виде больших частиц, участвующего в окислительно-восстановительных процессах не в полном объёме.

Выходные данные для цитирования русскоязычной печатной версии статьи:

Шафигуллина К.Э., Кречетов И.С., Болотников А.А., Берестов В.В., Лепкова Т.Л., Зырянова З.Е., Стаханова С.В. Зависимость свойств электродов суперконденсаторов на основе композитов углеродная ткань – полианилин от концентрации анилина в растворе при синтезе. *Бутлеровские сообщения*. 2025. Т.84. №10. С.73-83. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-73

Выходные данные для цитирования русскоязычной электронной версии статьи:

Шафигуллина К.Э., Кречетов И.С., Болотников А.А., Берестов В.В., Лепкова Т.Л., Зырянова З.Е., Стаханова С.В. Зависимость свойств электродов суперконденсаторов на основе композитов углеродная ткань – полианилин от концентрации анилина в растворе при синтезе. *Бутлеровские сообщения В*. 2025. Т.11. №4. Id.3. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-73/ROI-jbc-RB/25-11-4-3

The output for citing the English online version of the article:

Kristina E. Shafigullina, Ilya S. Krechetov, Anton A. Bolotnikov, Valentine V. Berestov, Tatiana L. Lepkova, Zlatotsveta E. Zyryanova, Svetlana V. Stakhanova. The dependence of the supercapacitors electrodes based on carbon cloth – polyaniline composites properties on the aniline concentration in the synthesis solution. *Butlerov Communications B.* **2025.** Vol.11. No.4. Id.3. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-73/ROI-jbc-B/25-11-4-3

Литература

- [1] E.T. Sayed, A.G. Olabi, A.H. Alami, A. Radwan, A. Mdallal, A. Rezk, M.A. Abdelkareem. Renewable Energy and Energy Storage Systems. *Energies.* **2023.** Vol.16. No.3. P.1415. DOI: 10.3390/en16031415
- [2] A.G. Olabi, A. Qaisar, A.A. Makky, M. A. Abdelkareem. Supercapacitors as next generation energy storage devices: Properties and applications. *Energy.* **2022.** Vol.248. P.123617. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123617
- [3] D. Lemian, F. Bode. Battery-supercapacitor energy storage systems for electrical vehicles: A review. *Energies.* **2022.** 15. No.15. P.5683. DOI: 10.3390/en15155683
- [4] P. Simon, Y. Gogotsi. Materials for electrochemical capacitors. *Nature Materials.* **2008.** Vol.7. No.11. P.845-854. DOI: 10.1038/nmat2297
- [5] G.A. Snook, P. Kao, A.S. Best. Conducting-polymer-based supercapacitor devices and electrodes. *Journal of Power Sources.* **2011.** Vol.196. No.1. P.1-12. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2010.06.084
- [6] Q. Wu, T. He, Y. Zhang, J. Zhang, Z. Wang, Y. Liu, Z. Lei, W. Youzhi, R. Fen. Cyclic stability of supercapacitors: materials, energy storage mechanism, test methods, and device. *Journal of Materials Chemistry A.* **2021.** Vol.9. No.43. P.24094-24147. DOI: 10.1039/d1ta06815f
- [7] E. Taer, R. Taslim, S. Sugianto, M. Paiszal, M. Mukhlis, W.S. Mustika, A. Agustino. Meso-and microporous carbon electrode and its effect on the capacitive, energy and power properties of supercapacitor. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems.* **2018.** Vol.9. No.3. P.1263. DOI: 10.11591/ijpeds.v9n3.pp1263-1271
- [8] S. Sagadevan, T. Balakrishnan, M.Z. Rahman, T. Soga, H. Randriamahazaka, B. Kakavandi, M.R. Johan. Agricultural biomass-based activated carbons for efficient and sustainable supercapacitors. *Journal of Energy Storage.* **2024.** Vol.97. P.112878 DOI: 10.1016/j.est.2024.112878
- [9] R. Jing, Y. Liu, H. Feng, K. Li, H. Shi, Q. Ma, Q. Ma. A review on graphene-based electrode materials for supercapacitor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry.* **2024.** Vol.137. P.106-121. DOI: 10.1016/j.jiec.2024.03.043
- [10] M. Mandal, A. Injamul, R.S. Manas, P. Santosini, M. Apurba, K.N. Alok, S. Subhasri, M. Pitamber. Simple pyrolysis synthesis of multi-walled carbon nanotubes as a highly stable electrode material for supercapacitor applications. *Chemical Physics Letters.* **2024.** Vol.853. P.141536. DOI: 10.1016/j.cplett.2024.141536
- [11] A.A. Yaqoob, M.N. Ibrahim, A. Ahmad, A. Khatoon, S.H. Setapar. Polyaniline-based materials for supercapacitors. *Handbook of Supercapacitor Materials: Synthesis, Characterization, and Applications.* **2021.** P.113-130. DOI: 10.1002/9783527824779.ch4
- [12] X. Chen, R. Paul, L. Dai. Carbon-based supercapacitors for efficient energy storage. *National Science Review.* **2017.** Vol.4. No.3. P.453-489. DOI: 10.1093/nsr/nwx009
- [13] Beguin F., Frackowiak E. Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications. *Weinheim: Wiley VCH.* **2013.** 568p.
- [14] G. Navathe, S. Prasad; A. Mane, S.H. Barge, T. D. Dongale, V. Shaikh, M.M. Karanjkar, S.B. Teli, P.S. Patil, N.R. Prasad. A Critical Review on Design and Development of New Generation Energy Storage Devices. *ES Energy Environ.* **2022.** P.11-32. DOI: 10.30919/eseec8c739
- [15] P. Lokhande, U. Chavan Inorganic Electrolytes in Supercapacitor. *Mater Res Found.* **2019.** Vol.61. P.11-30. DOI: 10.21741/9781644900499-2
- [16] M.S. Halper, J.C. Ellenbogen. Supercapacitors: A brief overview. *MITRE Nanosystems Group.* **2006.** Vol.1. P.8.
- [17] Conway B. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications, 1st ed. *Springer: New York, NY, USA.* **1999.** 698p.
- [18] A. Burke Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *Journal of Power Sources.* **2000.** Vol.91. No.1. P.37-50. DOI: 10.1016/S0378-7753(00)00485-7
- [19] S.V. Stakhanova, I.S. Krechetov, K.E. Shafigullina, T.L. Lepkova, V.V. Berestov, E.S. Statnik, Z.E. Zyryanova, E.A. Novikova, A.M. Korsunsky. Hierarchically Porous Carbon Cloth-Polyaniline (CC-PA NI) Composite Supercapacitor Electrodes with Enhanced Stability. *Crystals.* **2024.** Vol.14. No.5. P.457. DOI: 10.3390/cryst14050457
- [20] L. Holler P., J. Kovarova, J. Stejskal, M. Trchova. The stability of polyaniline in strongly alkaline or acidic aqueous media. *Polymer Degradation and Stability.* **2008.** Vol.93. No.3. P.592600. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.01.012

- [21] Kristina E. Shafigullina, Ilya S. Krechetov, Anton A. Bolotnikov, Valentine V. Berestov, Tatiana L. Lepkova, Zlatotsveta E. Zyryanova, Svetlana V. Stakhanova. The dependence of the supercapacitors electrodes based on carbon cloth – polyaniline composites properties on the aniline concentration in the synthesis solution. *Butlerov Communications B.* **2025**. Vol.11. No.4. Id.3. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-73/ROI-jbc-B/25-11-4-3
- [22] Шафигуллина К.Э., Кречетов И.С., Болотников А.А., Берестов В.В., Лепкова Т.Л., Зырянова З.Е., Стаханова С.В. Зависимость свойств электродов суперконденсаторов на основе композитов углеродная ткань – полианилин от концентрации анилина в растворе при синтезе. *Бутлеровские сообщения В.* **2025**. Т.11. №4. Id.3. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-73/ROI-jbc-RB/25-11-4-3

The English version of the article have been published in the international edition of the journal

Butlerov Communications B
Advances in Chemistry & Thermophysics

The Reference Object Identifier – ROI: jbc-B/25-11-4-3

The Digital Object Identifier – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/25-84-10-73/ROI-jbc-B/25-11-4-3

**The dependence of the supercapacitors electrodes based
on carbon cloth – polyaniline composites properties
on the aniline concentration in the synthesis solution**

**Kristina E. Shafigullina,¹⁺ Ilya S. Krechetov,¹ Anton A. Bolotnikov,¹ Valentine V. Berestov,¹
Tatiana L. Lepkova,¹ Zlatotsveta E. Zyryanova,² Svetlana V. Stakhanova^{2*}**

¹ *Department of Physical Chemistry. A.M. Butlerov Institute of Chemistry. University of Science and Technology MISIS. Lenin Ave., 4. Moscow, 119049. Russia. E-mail: k.shafigullina@gmail.com*

² *Department of Analytical Chemistry. Faculty of Natural Sciences. Mendeleeev University of Chemical Technology. Miusskaya Sq., 9. Moscow, 125047. Russia.*

*Supervising author; ⁺Corresponding author

Keywords: polyaniline, carbon cloth, composite electrodes, supercapacitor, double-layer capacitance, pseudocapacitance.

Abstract

In this work, composite materials for supercapacitor electrodes were prepared in the form of activated carbon cloth modified using the conducting polymer polyaniline. Polyaniline was synthesized via chemical oxidative polymerization with the aniline concentration ranging from 0.1 to 1 M. The study's findings revealed a correlation between the aniline content in the polymerization solution and the morphology and electrochemical properties of the composites. Investigation of the composite surfaces by scanning electron microscopy showed that the morphology of the polymer coating is significantly dependent on the monomer concentration. Isolated and localized regions of the polymer formations on the fabric surface with pinpoint inclusions of polymeric material observed in the pores on fiber cross-sections were detected at low polyaniline contents in the composites (0.1 to 0.25 M). A size and quantity of polymer formations on the cloth surfaces significantly increase was noted at high concentrations (0.5-1 M). The imbibition kinetics investigation results demonstrate a sharp decrease in the solutions containing polyaniline imbibition rate of activated carbon cloth as the polymer content increases. The electrochemical characteristics exhibit a pronounced non-monotonic dependence on the aniline content in the polymerization solution. A maximum specific capacitance of 4.40 F/cm² was achieved at an aniline content in the polymerization solution equal to 0.25 M. Analysis of this composite using the Trasatti method revealed a contribution of 69% from the electric double-layer capacitance and 31% from pseudocapacitance. A further content increase leads to a significant rise in resistance (up to 2.88 Ohm for 0.5 M and up to 6.17 Ohm for 1 M) and a decline in capacitance properties. This is attributed to the formation of polyaniline as large particles, which do not participate in redox processes to their full extent.