

УДК 537.533.7:621.793.18:678.746.47

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_53

EDN: NNLVFW

СИНТЕЗ И СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ГИДРОКСИЭТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ, ИНТЕРКАЛИРОВАННЫХ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ

М.А. Ярмоленко¹, Цзян Сяо Хун², А.А. Рогачев³, А.В. Рогачев¹,
А.С. Руденков¹, С.А. Фролов¹, А.М. Михалко¹

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Нанкинский университет науки и технологии

³ГНУ «Институт химии новых материалов Национальной Академии Наук Беларуси»

SYNTHESIS AND SORPTION PROPERTIES OF COATINGS BASED ON HYDROXYETHYL CELLULOSE INTERCALATED FROM THE GAS PHASE WITH ANTIBACTERIAL COMPOUNDS

M.A. Yarmolenko¹, Jiang Xiao Hong², A.A. Rogachev³, A.V. Rogachev¹,
A.S. Rudenkov¹, S.A. Frolov¹, A.M. Mikchalko¹

¹Francisk Skorina Gomel State University

²Nanjing University of Science and Technology

³SSI «Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus»

Аннотация. Установлена высокая эффективность применения метода электронно-лучевого диспергирования при осаждении однокомпонентных и композиционных покрытий на основе гидроксиэтилцеллюлозы и октенидина, определена их молекулярная структура и свойства. Молекулярная структура покрытия на основе гидроксиэтилцеллюлозы содержит более высокую концентрацию C–O, C–C (sp³), C–OH связей в сравнении со структурой исходного органического соединения. Покрытие характеризуется высокой скоростью и монотонным характером высвобождения октенидина в водную среду.

Ключевые слова: электронно-лучевое диспергирование, покрытие, гидроксиэтилцеллюлоза, октенидин, структура, свойства.

Для цитирования: Синтез и сорбционные свойства покрытий на основе гидроксиэтилцеллюлозы, интеркалированных из газовой фазы антибактериальным соединением / М.А. Ярмоленко, Цзян Сяо Хун, А.А. Рогачев, А.В. Рогачев, А.С. Руденков, С.А. Фролов, А.М. Михалко // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 4 (57). – С. 53–59. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_53. – EDN: NNLVFW

Abstract. The high efficiency of using the electron beam dispersion method in the deposition of single-component and composite coatings based on hydroxyethylcellulose and octenidine was established, and their molecular structure and properties were determined. In the outer layers, the coating contains a higher concentration of C–O, C–C (sp³), C–OH bonds in comparison with the structure of the original organic compound. The coating is characterized by high speed and monotonous dissolution of octenidine in solutions.

Keywords: electron beam dispersion, coating, hydroxyethylcellulose, octenidine, structure, properties.

For citation: Synthesis and sorption properties of coatings based on hydroxyethyl cellulose intercalated from the gas phase with antibacterial compounds / M.A. Yarmolenko, Jiang Xiao Hong, A.A. Rogachev, A.V. Rogachev, A.S. Rudenkov, S.A. Frolov, A.M. Mikchalko // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 4 (57). – P. 53–59. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_53 (in Russian). – EDN: NNLVFW

Введение

Разработка новых составов и технологий формирования функциональных материалов, применяемых в качестве элементов имплантатов, является одним из активно развиваемых в последнее время направлений исследований. Использование в качестве основы композиционных материалов медицинского назначения природных, легко деградируемых в человеческом организме соединений, позволяет реализовать

комплекс свойств, определяющий их высокий лечебный эффект. В числе таких перспективных материалов следует отметить покрытия на основе модифицированной целлюлозы, содержащие антибактериальные препараты [1]. В частности, перспективно применение слоев гидроксиэтилцеллюлозы (ГЭЦ), которая в биологических средах полностью разлагается без образования токсичных для живых существ промежуточных продуктов биохимических реакций [2]. При этом

гидроксиэтилцеллюлоза проявляет гипоаллергенные свойства и эффективно используется при гидрофилизации [3]. Данное соединение хорошо растворяется в воде, однако формирование на его основе композиционных высокодисперсных материалов, содержащих гидрофобные лекарственные препараты, растворными методами не представляется возможным. В связи с этим выбор и обоснование технологических приемов формирования таких слоев с заданными дисперсностью и распределением ингредиентов представляет практический и научный интерес.

При формировании композиционных материалов путем осаждения из активной газовой фазы ограничения, связанные с различием химических, теплофизических, термодинамических свойств компонентов не являются определяющими [4]. Высокая универсальность данного метода достигается переводом молекулярных образований заданных веществ в летучее состояние, их активацией и последующим осаждением на поверхности с образованием конденсированных слоев. Структура, состав осажденных покрытий регулируются достаточно эффективно путем изменения условий и режима энергетического воздействия на стадии генерации летучих продуктов, их переноса в газовой среде, осаждения на поверхности. При этом исключается применение жидких сред, являющихся источником загрязнений.

Основной целью настоящей работы является оценка эффективности электронно-лучевого осаждения композиционных покрытий на основе гидроксиэтилцеллюлозы и октенидина, определение их молекулярной структуры.

1 Методика формирования покрытий и исследования

Формирование композиционных покрытий на основе ГЭЦ и октенидина проводилось методом электронно-лучевого диспергирования с помощью устройства и методики, представленных в [5], [6]. Из-за ограниченной растворимости октенидина осаждение таких композиционных покрытий из раствора не осуществимо. В качестве мишеней были использованы порошки гидроксиэтилцеллюлозы и смеси ее с октенидином с массовым содержанием 1:1.

В процессе нанесения покрытия регистрировали изменение давления в вакуумной камере (начальное давление составляло $2 \cdot 10^{-3}$ Па) и скорость роста тонкого слоя с помощью кварцевого измерителя. Изменение условий генерации летучих продуктов электронно-лучевого диспергирования осуществляли в одном технологическом цикле путем варьирования тока накала электронной пушки и величины ускоряющего напряжения.

Молекулярную структуру нанесенных покрытий определяли методом ИК-спектроскопии на ИК-Фурье спектрофотометре Vertex-70 (Bruker) с использованием стандартной МНПВО

приставки (многократное нарушенное полное внутреннее отражение). При реализации данной методики покрытия из продуктов диспергирования осаждались на пленки металлизированного лавсана. Численная обработка спектров осуществлялась с помощью программы OPUS.

Анализ химической структуры и элементного состава покрытий проводили методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Измерения осуществляли на XPS-микросонде PHI Quantera II Scanning XPS с использованием Al K α в качестве источника монохроматического рентгеновского излучения ($h\nu = 1486,6$ эВ). РФЭС исследования выполняли при следующих параметрах: 1) угол эмиссии электронов – 45°; 2) область анализа составляла 100 мкм \times 100 мкм; 3) давление при проведении РФЭС-анализа соответствовало $1,9 \cdot 10^{-7}$ Па. РФЭС анализ проводили с учетом рекомендаций, представленных в работах [7], [8]. Перед измерением образцы подвергали травлению ионами аргона для очистки поверхности покрытий от постороннего углерода. Параметры травления: время – 1 мин, ускоряющее напряжение – 2 кВ, угол падения – 45°. Травление необходимо для очистки поверхности покрытия от постороннего углерода. Полосы РФЭС-спектров были обработаны с помощью приложения OPUS. Для удаления фонового вклада использован метод Ширли. Аппроксимацию фотоэлектронных линий производили с помощью функции Гаусса.

ЯМР ^1H спектры порошка ГЭЦ и покрытия на его основе получали с использованием спектрометра Bruker Avance 400 МГц. Растворителем являлся диметилсульфоксид.

Кинетику высвобождения октенидина из композиционного покрытия в физиологический раствор устанавливали по методике, приведенной в [9].

2 Результаты исследования и их обсуждение

На начальных стадиях воздействия потока электронов на мишень с ГЭЦ и ее смеси регистрируется оплавление порошка. На данной стадии отсутствует заметное изменение давления в вакуумной камере, кварцевый измеритель толщины не фиксирует начало процесса нанесения покрытия (рисунок 2.1). Данные об изменении давления в вакуумной камере и скорости роста, полученные при диспергировании мишеней при ускоряющем напряжении 1000 и 500 В и токе накала 10 А, свидетельствуют о практически линейной зависимости параметров нанесения от мощности потока электронов. Характер изменения давления и скорости роста покрытий, в частности, отсутствие индукционного начального периода, резкое снижение процесса генерации летучих продуктов диспергирования при выключении источника электронов указывают на преимущественно нетепловой механизм генерации летучих продуктов диспергирования.

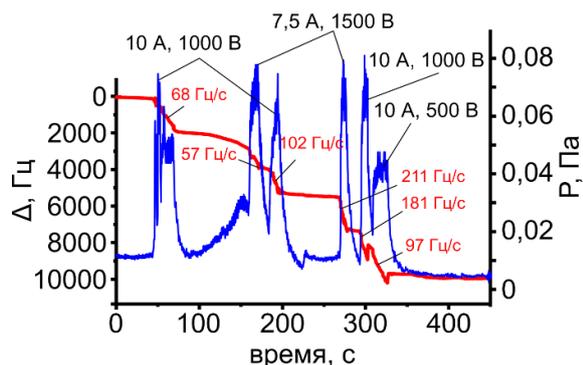


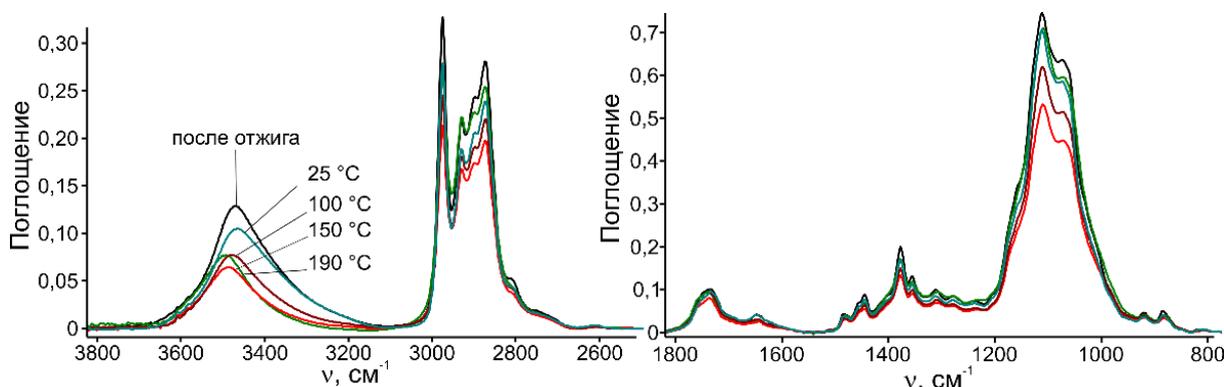
Рисунок 2.1 – Кинетические зависимости давления в камере и скорости роста покрытий при различных режимах электронно-лучевого диспергирования порошка ГЭЦ

Анализ ИК-спектров покрытий на основе ГЭЦ, представленных на рисунке 2.2, показывает, что их молекулярная структура имеет много общего со структурой покрытий на основе микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) [9].

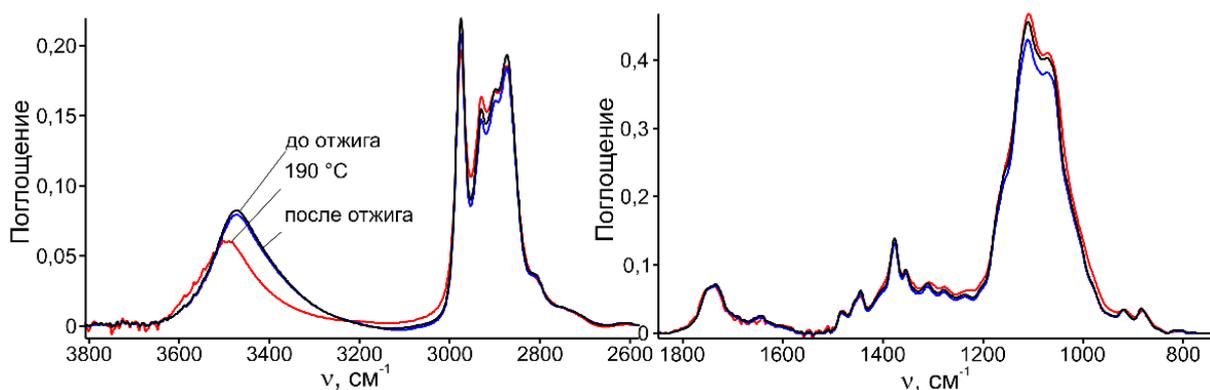
При этом тонкий слой на основе ГЭЦ в сравнении с МКЦ не обладает способностью микрокристаллической целлюлозы интенсивно сорбировать влагу из атмосферы воздуха. На это указывают невысокие значения оптической плотности полосы в интервале $3700\text{--}3000\text{ см}^{-1}$

(валентные колебания ОН-групп). В области волновых чисел $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ проявляются валентные колебания С–Н связей: полоса при 2975 см^{-1} ($-\text{OC}_2\text{H}_5$), $2898, 2800\text{ см}^{-1}$ – CH_3 , при 2930 см^{-1} – CH_2 , при 2873 см^{-1} – CH (третичный) [10], [11]. В интервале $1200\text{--}900\text{ см}^{-1}$ – валентные колебания С–О, С–О–С, С–С, С–ОН связей. Наибольшее значение оптической плотности в интервале $1200\text{--}900\text{ см}^{-1}$ характерно для валентных колебаний С–О–С связей (1111 и 1070 см^{-1}).

Нагрев покрытия сопровождается десорбцией молекул адсорбированной влаги. На это указывает снижение оптической плотности полос поглощения в области колебаний гидроксильных групп ($3700\text{--}3000\text{ см}^{-1}$) и при 1640 см^{-1} (деформационные колебания молекул воды). Помимо десорбции влаги регистрируется протекание процессов деструкции тонкого покрытия: постепенное повышение температуры до 150°C сопровождается монотонным снижением оптической плотности всех полос поглощения в ИК-спектре. При температуре нагрева 190°C фиксируется рост поглощения во всем диапазоне волновых чисел ИК-спектра покрытия. Исключением является область ($3700\text{--}3000\text{ см}^{-1}$) и полоса при 1640 см^{-1} . Рост поглощения может быть связан с возникновением межмолекулярных сшивок (эфирные связи) с участием этанольных заместителей.



а) один цикл нагрева (нагрев от 25°C до 190°C и последующее охлаждение до 25°C)



б) два цикла нагрева

Рисунок 2.2 – ИК-спектры покрытия на основе ГЭЦ

Следует отметить, нагрев до 190°C покрытий на основе микрокристаллической целлюлозы сопровождается разрушением эфирных связей и пиранозных циклов. Влияние кислорода может проявляться в повышении интенсивности поглощения C – H связей в ИК-спектре. В частности, в работе [11] отмечено, что ацетилирование сопровождается повышением интенсивности полосы при 1380 см⁻¹.

При повторном отжиге было зафиксировано снижение оптической плотности всех полос поглощения. Результат косвенно подтверждает вывод об образовании сшитой структуры.

Проведено определение молекулярной структуры покрытий на основе ГЭЦ с помощью РФЭС (рисунок 2.3). Полосу C 1s раскладывали на оставляющие полосы в соответствии с молекулярной структурой ГЭЦ: 284,7 эВ – C – C (sp²); 285,5 эВ – C – O, C – C (sp³), C – OH; 286,4 эВ – C – O / C – OH [12]–[14]; 287,3 эВ – C = O [15], [16]; 288,5 эВ – C = O / –COOH [16], [17]; 289,5 эВ – O – C = O [18]–[20].

Молекулярная структура покрытия на основе ГЭЦ характеризуется более высоким содержанием C – O, C – C (sp³), C – OH связей в сравнении со структурой исходного органического соединения. Результат может быть следствием разрушения молекул ГЭЦ с последующим окислением углеводородных фрагментов. Содержание C – C (sp²) связей в молекулярной структуре покрытия не отличается от содержания аналогичных связей в структуре исходного ГЭЦ. Таким образом, воздействие потока электронов не сопровождается возникновением ненасыщенных

C = C связей и ароматических структур в осаждаемом покрытии. Следует отметить, что в процессе электронно-лучевого воздействия цвет порошка ГЭЦ в мишени меняется с белого на черный, что указывает на ее карбонизацию. Поэтому при нанесении покрытия на более поздней стадии в молекулярной структуре наблюдается рост C – C (sp³) связей. Ранее уже было отмечено, что образование ароматических структур в мишени не характерно для процесса электронно-лучевого диспергирования ГЭЦ в вакууме.

Наиболее заметным отличием структуры покрытия от структуры исходного соединения является более низкое содержание в тонком слое C = O связей. Высокое содержание карбонильных групп в структуре порошка может быть обусловлено технологическими особенностями синтеза ГЭЦ, присутствием следовых количеств низкомолекулярных фрагментов химических реагентов. При воздействии потока электронов на порошок ГЭЦ такие соединения легко десорбируются и удаляются системой откачки.

Представленные на рисунке 2.3 РФЭС спектры позволяют провести анализ структуры покрытия по толщине. Видно, что химический состав мишени при нанесении непрерывно меняется. Так, верхний слой покрытия сформирован фрагментами, образованными при наиболее длительном воздействии потока электронов на ГЭЦ. По этой причине содержание C – C (sp²) связей на поверхности покрытия выше, чем вблизи подложки. При этом молекулярная структура покрытия, в целом, является относительно однородной по толщине. Это может быть связано

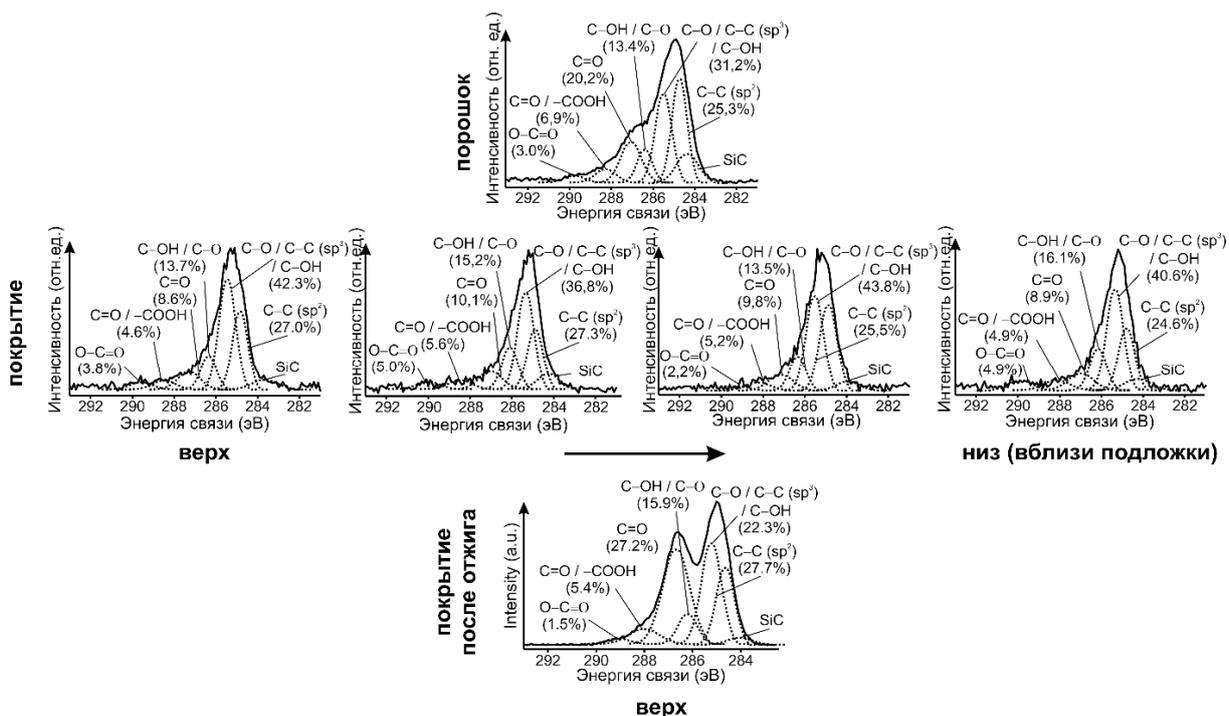


Рисунок 2.3 – РФЭС спектры ГЭЦ

с тем, что низкомолекулярные фрагменты деструкции порошка ГЭЦ не способны конденсироваться на подложке. Образование низкомолекулярных фрагментов деструкции ГЭЦ происходит при длительном воздействии потока электронов на органическое соединение.

Отжиг сопровождается частичной деструкцией молекулярной структуры покрытия, которая является причиной изменения концентрации пиранозных циклов, эфирных связей и этанольных заместителей. Деструкция сопровождается также последующим окислением углеводородных фрагментов. Косвенно на это указывает рост содержания C=O связей. Отметим, что данные результаты согласуются с данными ИК-спектроскопии.

Анализ результатов ¹H ЯМР спектроскопии, представленных на рисунке 2.4, показывает, что отличия спектров исходной ГЭЦ и покрытия фиксируются в области 3,3–3,2 ppm, 2,1–1,3 ppm.

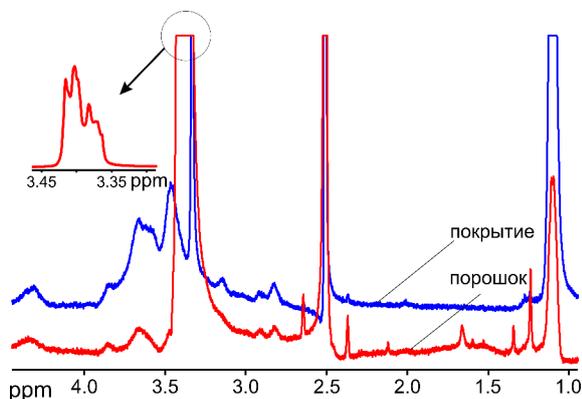
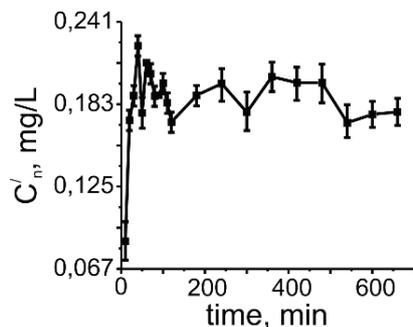
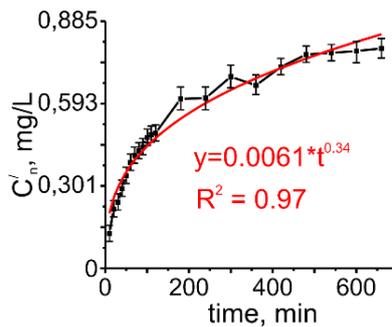


Рисунок 2.4 – ¹H ЯМР спектры ГЭЦ

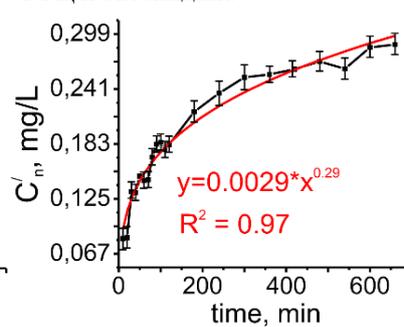
Широкие пики между 3,20 и 3,30 ppm были приписаны сигналам трех протонов (H2, H3 и H4) в ангидроглюкозных единицах (AGU). В ¹H ЯМР спектре покрытия отсутствуют полосы при 2,1, 1,6 и 1,3 ppm, которые могут быть соотнесены с протонами метиленовых, метильных, ацетатных и эфирных групп боковых заместителей [21]–[23]. Результаты ¹H ЯМР спектроскопии также указывают на частичную деструкцию пиранозных циклов и боковых заместителей (–CH₂CH₂OH).



а) покрытие октенидина;



б) – покрытие ГЭЦ + октенидин;



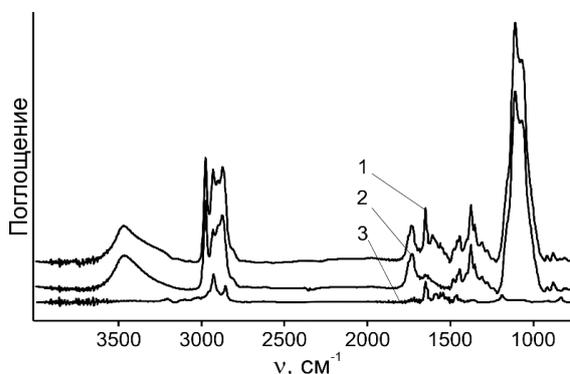
в) – покрытие (ГЭЦ + поликапролактон) + октенидин

Рисунок 2.6 – Изменение концентрации октенидина в физиологическом растворе

Согласно данным ЯМР спектроскопии, воздействие потока электронов на ГЭЦ не сопровождается интенсивной деструкцией молекулярной структуры высокомолекулярного соединения.

В ИК-спектре композиционного покрытия на основе ГЭЦ и октенидина присутствуют все полосы поглощения, характерные для исходных компонентов мишени (рисунок 2.5). По этой причине композиционный слой можно рассматривать как высокодисперсную механическую смесь исходных компонентов.

Характер межфазного взаимодействия в значительной степени определяет особенности высвобождения антибактериальных лекарственных компонентов из композиционного слоя (рисунок 2.6). Если при нахождении покрытия октенидина после двух часов нахождения покрытия в физиологическом растворе концентрация октенидина выходит на «плато» и в течение последующих 9 часов фиксируются периодические изменения концентрации относительно установившегося значения «насыщения», то при введении октенидина в матрицу гидроксиэтилцеллюлозы характер высвобождения существенно изменяется: концентрация препарата монотонно повышается в процессе выдержки в растворе. При описании кинетики высвобождения октенидина из композиционного слоя моделью Peppas-Korsmeyer показатель экспоненты $n = 0,29$.



- 1 – покрытие ГЭЦ + октенидин;
- 2 – покрытие на основе ГЭЦ;
- 3 – покрытие на основе октенидина;

Рисунок 2.5 – ИК-спектры покрытий на основе ГЭЦ и октенидина

Монотонное высвобождение октенидина в водную среду с показателем экспоненты в модели Peppas – Korsmeyer $n = 0,29$ фиксируется и из композиционного покрытия (ГЭЦ + поликапролактон) + октенидин (рисунок 2.6, в). При этом скорость высвобождения лекарственного соединения заметно ниже скорости его высвобождения из тонкого слоя на основе ГЭЦ + октенидин. Отмеченное может быть связано со структурой композиционного слоя, а также с особенностями процесса электронно-лучевого диспергирования многокомпонентной смеси. Наличие сильного межмолекулярного взаимодействия (водородных связей) между фрагментами органических высокомолекулярных соединений препятствует быстрому высвобождению лекарства.

Заключение

Определены закономерности формирования покрытий гидроксипропилцеллюлозы и композиционных слоев на ее основе и октенидина методом электронно-лучевого диспергирования, их молекулярная структура и свойства. Установлено, что при воздействии потока низкоэнергетических электронов на ГЭЦ регистрируется квазистационарная генерация летучих продуктов, давление в камере и скорость осаждения которых практически линейно зависит от мощности потока электронов. Осажденные слои имеют молекулярную структуру близкую к структуре исходных соединений. В покрытиях отмечается наличие межмолекулярных швов с участием этанольных заместителей, окисление углеводородных фрагментов. При этом электронно-лучевое воздействие не сопровождается возникновением ненасыщенных C = C связей и ароматических структур. Покрытия по своему химическому составу являются достаточно однородными по толщине. Во внешних слоях покрытие содержит более высокую концентрацию C–C (sp^3) связей. Термическая обработка тонкого слоя сопровождается формированием сшитой структуры.

Композиционные покрытия ГЭЦ + октенидин в отличие от однокомпонентных слоев октенидина характеризуются высокой скоростью и монотонным характером растворения октенидина в водных средах. Монотонное высвобождение октенидина в водную среду фиксируется и из композиционного покрытия (ГЭЦ + поликапролактон) + октенидин. При этом скорость высвобождения лекарственного соединения заметно ниже скорости его высвобождения из тонкого слоя на основе ГЭЦ + октенидин, что свидетельствует о проявлении более сильного межмолекулярного взаимодействия (образовании водородных связей) между фрагментами органических высокомолекулярных соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Functionalization and Antibacterial Applications of Cellulose-Based Composite Hydrogels* / Y. Bao,

J. He, K. Song, J. Guo, X. Zhou, S. Liu // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14. – P. 769. – DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14040769>.

2. *Design and characterization of an antibacterial film composited by hydroxyethyl cellulose (HEC), carboxymethyl chitosan (CMCS), and nano ZnO for food packaging* / C. Cen, F. Wang, Y. Wang, H. Li, L. Fu, Y. Li, J. Chen, Y. Wang // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2023. – Vol. 231. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123203>.

3. *Temperature and oxidation-responsive ion pair self-assembly composed of hydroxyethyl cellulose ethoxylate and phenylthio acetic acid* / K. Wangpimool, K. Rana, J.-C. Kim // *Cellulose*. – 2023. – Vol. 30. – P. 7591–7606. <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05375-6>.

4. *Structure and properties of microcellulose-based coatings deposited via a low-energy electron beam and their effect on the properties of wound dressings* / Y. Liu, X. Qin, A.V. Rogachev, A.A. Rogachev, I.I. Kontsevaya, A.E. Pyzh, Xiaohong Jiang, V.A. Yarmolenko, A.S. Rudenkov, M.A. Yarmolenko // *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. – 2021. – № 2. – P. 100146. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100146>.

5. *Pyzh Low-energy electron beam deposition of coatings based on lignin and quercetin, their structure and properties* / Y. Liu, J. Cao, A.V. Rogachev, A.A. Rogachev, I.I. Kontsevay, Xiaohong Jiang, V.A. Yarmolenko, A.S. Rudenkov, M.A. Yarmolenko, D.L. Gorbachev, A.E. // *Vacuum*. – 2022. – Vol. 205. – 111416.

6. *Low-energy electron beam deposition of metal-containing organic-inorganic coatings with selective activity against microorganisms* / Y. Liu, A.V. Rogachev, Xiaoxue Tana, A.A. Rogachev, Xiaohong Jiang, A.E. Pyzh, V.A. Yarmolenko, M.A. Yarmolenko, A.S. Rudenkov // *Vacuum*. – 2023. – Vol. 209. – P. 111803.

7. *XPS guide: Charge neutralization and binding energy referencing for insulating samples* / D.R. Baer, K. Artyushkova, H. Cohen, C.D. Easton, M. Engelhard, T.R. Gengenbach, G. Greczynski, P. Mack, D.J. Morgan, A. Roberts // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 2020. – № 38. – P. 031204. – DOI: <https://doi.org/10.1116/6.0000057>.

8. *Greczynski, G. A step-by-step guide to perform x-ray photoelectron spectroscopy* / G. Greczynski, L. Hultman // *J. Appl. Phys.* – 2022. – № 132. – P. 011101. – DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0086359>.

9. *Structure and properties of microcellulose-based coatings deposited via a low-energy electron beam and their effect on the properties of wound dressings* / Y. Liu, X. Qin, A.V. Rogachev, A.A. Rogachev, I.I. Kontsevaya, A.E. Pyzh, Xiaohong Jianga, V.A. Yarmolenko, A.S. Rudenkov, M.A. Yarmolenko // *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. – 2021. – № 2. – P. 100146. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100146>.

10. Bellamy, L.J. The Infra-red Spectra of Complex Molecules. Front Cover / L.J. Bellamy. – Methuen. Molecular spectra. – 1954. – 323 p.
11. Nakanishi, K. Infrared Absorption Spectroscopy / K. Nakanishi. – Tokyo Kyoiku University. Holden-Day, Inc., San Francisco, 1962. – 233 p.
12. *Low-energy electron beam deposition of coatings based on lignin and quercetin, their structure and properties* / Y. Liu, J. Cao, A.V. Rogachev, A.A. Rogachev, I.I. Kontsevay, Xiaohong Jiang, V.A. Yarmolenko, A.S. Rudenkov, M.A. Yarmolenko, D.L. Gorbachev, A.E. Pyzh // *Vacuum*. – 2022. – Vol. 205. – P. 111416.
13. *Low-energy electron beam deposition of metal-containing organic-inorganic coatings with selective activity against microorganisms* / Y. Liu, A.V. Rogachev, Xiaoxue Tana, A.A. Rogachev, Xiaohong Jiang, A.E. Pyzh, V.A. Yarmolenko, M.A. Yarmolenko, A.S. Rudenkov // *Vacuum*. – 2023. – Vol. 209. – P. 111803.
14. *Revealing the adsorption mechanism of copper on hemp-based materials through EDX, nano-CT, XPS, FTIR, Raman, and XANES characterization techniques* / C. Mongioví, G. Crini, X. Gabrion, V. Placet, V. Blondeau-Patissier, A. Krystianiak, S. Durand, J. Beaugrand, A. Dorlando, C. Rivard, L. Gautier, A. Rita Lado Ribeiro, D. Lacalmita, B. Martel, J.-N. Staelens, A. Ivanovska, M. Kostic, O. Heintz, C. Bradu, M. Raschetti, N. Morin-Crini // *Chemical Engineering Journal Advances*. – 2022. – Vol. 10. – P. 100282.
15. *Synthesis and Study of the Physicochemical Properties of a Mesoporous Carbon Sorbent Modified with Amino Acids* / A.V. Sedanova, L.G. Pyanova, M.S. Delyagina, N.V. Kornienko, D.N. Ogurtsova, S.N. Nesov, V.A. Drozdov, N.N. Leonteva, A.V. Lavrenov // *Prot Met Phys Chem Surf*. – 2022. – Vol. 58. – P. 913–919. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205122050227>.
16. A. Kolanowska, G. Dzido, M. Krzywiecki, M. M. Tomczyk, D. Lukowicz, S. Ruczka, Slawomir Boncel Carbon Quantum Dots from Amino Acids Revisited: Survey of Renewable Precursors toward High Quantum-Yield Blue and Green Fluorescence // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7. – P. 41165–41176. – DOI: [10.1021/acsomega.2c04751](https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04751).
17. M. Teske, H. Lange, K. Wulf, V. Senz, N. Grabow, T. Eickner, S. Oschatz Chemical characterization of plasma polymerized allylamine coatings with addition of ammonia and oxygen by XPS // *Current Directions in Biomedical Engineering*. – 2022. – Vol. 8. – P. 664–667. – DOI: <https://doi.org/10.1515/cdbme-2022-1169>.
18. *Interphase formation with carboxylic acids as slurry additives for Si electrodes in Li-ion batteries. Part 2: a photoelectron spectroscopy study* / F. Jeschull, H. Q. Pham, A. Ghamlouche, P. K. Thakur, S. Trabesinger, J. Maibach // *J. Phys. Energy*. – 2023. – Vol. 5. – P. 025002. – DOI: [10.1088/2515-7655/acbbe](https://doi.org/10.1088/2515-7655/acbbe).
19. *Bioactive textile coatings for improved viral protection: A study of polypropylene masks coated with copper salt and organic antimicrobial agents* / G.B. Calais, J.B.M.R. Neto, R.A. Bataglioli, P. Chevalier, J. Tsukamoto, C.W. Arns, D. Mantovani, M.M. Beppu // *Applied Surface Science*. – 2023. – Vol. 638. – P. 158112. – DIO: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.158112>.
20. *Surface and Structural Characterization of PVTMS Films Treated by Elemental Fluorine in Liquid Perfluorodecalin* / N.A. Belov, A.Y. Alentiev, D.S. Pashkevich, F.A. Voroshilov, E.S. Dvilis, I.P. Asanov, R.Y. Nikiforov, S.V. Chirkov, D.A. Syrtsova, J.V. Kostina, Y.G. Bogdanova // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – P. 913. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16030913>.
21. Schaller, J. Studies on the Synthesis of 2,3-O-Hydroxyalkyl Ethers of Cellulose / J. Schaller, T. Heinze // *Macromol. Biosci*. – 2005. – Vol. 5. – P. 58–63. – DOI: [10.1002/mabi.200400136](https://doi.org/10.1002/mabi.200400136).
22. Heinze, T. New water-soluble cellulose esters synthesized by an effective acylation procedure / T. Heinze, J. Schaller // *Macromol. Chem. Phys*. – 2000. – Vol. 201. – P. 1214–1218. – DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-3935\(20000801\)201:12<1214::AID-MACP1214>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1521-3935(20000801)201:12<1214::AID-MACP1214>3.0.CO;2-9).
23. *Thermal, Crystallization Properties, and Micellization Behavior of HEC-g-PPDO Copolymer: Microstructure Parameters Effect* / X.-T. Dong, W.-T. Shi, H.-C. Dang, W.-Y. Bao, X.-L. Wang, Y.-Z. Wang // *Ind. Eng. Chem. Res*. – 2012. – Vol. 51. – P. 14037–14046. – DOI: [dx.doi.org/10.1021/ie300873a](https://doi.org/10.1021/ie300873a).

Работа выполнена в рамках выполнения задания «Плазмохимическое осаждение и конструкция покрытий с пролонгированным освобождением лекарственных препаратов и их применение для лечения костных повреждений» по договору с БРФФИ №X22КИТГ-024 и проекта № 2022YFE0196800 Национального фонда естественных наук Китая Министерства науки и технологий КНР, а также в рамках НИИР «Разработка основ комбинированной технологии формирования планарно-структурированных углеродных покрытий из импульсной катодной углеродной плазмы и продуктов лазерного диспергирования полимерных материалов», комплексное задание 1.12 ГПНИ «Фотоника и электроника для инновации», подпрограмма «Фотоника и ее применения».

Поступила в редакцию 27.09.2023.

Информация об авторах

Ярмоленко Максим Анатольевич – д.т.н., доцент
Цзян Сюэ Хун – доктор наук, профессор
Рогачев Александр Александрович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.т.н., профессор
Рогачёв Александр Владимирович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.х.м., профессор
Руденков Александр Сергеевич – к.т.н., доцент
Фролов Сергей Анатольевич – стажер мл.н.с.
Михалко Алексей Михайлович – аспирант