

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИММОБИЛИЗАЦИИ МИКРОКАПСУЛИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Ф. Алехина, К.А. Ерзунов, О.И. Одинцова, Л.С. Петрова

Кафедра химической технологии текстильных материалов, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр-т, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: anast.aleohina2016@yandex.ru, erzunovk@mail.ru, odolga@yandex.ru, ludmila_odintsova@mail.ru

Технология микрокапсулирования активно внедряется в текстильную промышленность как перспективный метод создания текстильно-вспомогательных веществ (ТВВ) на основе микрокапсул с активными компонентами, предназначенных для функциональной модификации текстильных материалов. Инкапсулирование ароматических отдушек, эфирных масел, антимикробных препаратов и веществ с фазовым переходом (ВФП) обеспечивает контролируемое высвобождение этих соединений посредством формирования барьерной оболочки и значительно расширяет функциональность текстиля. Преимуществом является сохранение свойств активных веществ благодаря их защите от химико-физических воздействий за счет формирования оболочек. Имобилизованные микрокапсулы обеспечивают устойчивые функциональные характеристики (ароматические, антибактериальные, терморегулирующие и др.) текстильных материалов даже при интенсивной эксплуатации. Особое внимание уделяется ВФП, которые в чистом виде сложно закреплять на волокнообразующем полимере из-за их способности к растеканию в процессе плавления, что сокращает временной промежуток действия терморегулирующего эффекта по причине схода активного вещества с текстильного материала. Микрокапсулирование решает эту проблему, продлевая действие терморегулирующей способности, устойчивость к многократным стиркам и термоциклированию без ухудшения качества текстиля.

В основе технологии лежит выбор материала оболочки микрокапсул, определяемый условиями эксплуатации готового текстильного материала и требуемыми функциональными характеристиками. Важными критериями имобилизуемых микрокапсул на основе веществ с фазовым переходом являются однородность размера, оптимальное соотношение компонентов ядра и оболочки, механическая и термическая стабильность оболочки, а также совместимость с другими текстильно-вспомогательными веществами. Современные подходы акцентируют внимание на дополнительных видах обработки и методах иммобилизации микрокапсул.

В частности, рассматриваются методы нанесения микрокапсул на поверхность волокнообразующего полимера с использованием связующих веществ различной природы (синтетических и природных). Альтернативной стратегией является химическая "пришивка", обеспечивающая ковалентное связывание оболочки микрокапсул с текстильным материалом, а также формирование водородных связей. Предлагают разработку микрокапсул с двойной оболочкой, где внешняя оболочка обладает функциональностью для химического взаимодействия с группами волокна. Кроме того, исследуют методы постобработки материалов с нанесенными микрокапсулами с использованием атмосферной плазмы и ультрафиолетового отверждения. Таким образом, выбор метода нанесения микрокапсул и технологических режимов отделки определяет функциональность и долговечность материала, учитывая свойства текстильной основы, эксплуатационные требования, экономические и экологические аспекты.

Ключевые слова: микрокапсулирование, вещества с фазовым переходом, иммобилизация на текстильный материал, оболочка

PROGRESSIVE TECHNOLOGIES FOR IMMOBILIZATION OF MICROENCAPSULATED PHASE TRANSITION SUBSTANCES TO OBTAIN FUNCTIONAL TEXTILE MATERIALS

A.F. Alekhina, K.A. Erzunov, O.I. Odintsova, L.S. Petrova

Department of Chemical Technology of Textile Materials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremet'yevo Ave., 7, Ivanovo, 153000, Russian Federation

E-mail: anast.alekhina2016@yandex.ru, erzunovk@mail.ru, odolga@yandex.ru, ludmila_odintsova@mail.ru

Microcapsulation technology is being actively introduced into the textile industry as a promising method for creating textile auxiliaries based on microcapsules with active components designed for functional modification of textile materials. The encapsulation of aromatic fragrances, essential oils, antimicrobials, and phase transition substances (PTS) ensures the controlled release of these substances through the formation of a barrier shell and significantly expands the functionality of textiles. The advantage is the preservation of the active substances properties due to their protection from chemical and physical influences due to the formation of shells. Immobilized microcapsules provide stable functional characteristics (aromatic, antibacterial, thermoregulating, etc.) of textile materials even during intensive use. Special attention is paid to PTS, which in their pure form are difficult to fix on a fiber-forming polymer due to their ability to spread during melting, which reduces the time interval of the thermoregulating effect due to the release of the active substance from the textile material. Microcapsulation solves this problem by prolonging the effect of thermoregulatory ability, resistance to repeated washing and thermal cycling without compromising the quality of textiles.

The technology is based on the choice of the microcapsule shell material, determined by the operating conditions of the finished textile material and the required functional characteristics. Important criteria for immobilized microcapsules based on substances with a phase transition are uniformity of size, optimal ratio of core and shell, mechanical and thermal stability of the shell, as well as compatibility with other textile auxiliaries. Modern approaches focus on additional types of processing and methods of immobilization of microcapsules.

In particular, methods of applying microcapsules to the surface of a fiber-forming polymer using binders of various natures (synthetic and natural) are considered. An alternative strategy is chemical "stitching", which ensures covalent bonding of the microcapsule shell to the textile material, as well as the formation of hydrogen bonds. It is proposed to develop microcapsules with a double shell, where the outer shell has the functionality for chemical interaction with fiber groups. In addition, methods of post-treatment of materials with deposited microcapsules using atmospheric plasma and ultraviolet curing are being investigated. Thus, the choice of the microcapsule application method and finishing process modes determines the functionality and durability of the material, taking into account the properties of the textile base, operational requirements, economic and environmental aspects.

Keywords: microcapsulation, phase transition substances, immobilization on textile material, shell

Для цитирования:

Алехина А.Ф., Ерзунов К.А., Одинцова О.И., Петрова Л.С. Прогрессивные технологии иммобилизации микрокапсулированных веществ с фазовым переходом для получения функциональных текстильных материалов. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 4. С. 5–12. DOI: 10.6060/rcj.2025694.1.

For citation:

Alekhina A.F., Erzunov K.A., Odintsova O.I., Petrova L.S. Progressive technologies for immobilization of microencapsulated phase transition substances to obtain functional textile materials. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 4. P. 5–12. DOI: 10.6060/rcj.2025694.1.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время микрокапсулирование находит активное применение в текстильной промышленности, позволяя инкапсулировать активные вещества (ароматические отдушки, эфирные масла, антимикробные препараты, вещества с фазовым переходом (ВФП)) в специальные оболочки, что обеспечивает их контролируемое высвобождение и повышение функциональных свойств текстильных материалов [1].

Ограничения, связанные со способностью веществ с фазовым переходом к текучести в процессе плавления, делают закрепление их в чистом виде на текстильном материале затрудненным и неэффективным, сокращая временной диапазон и снижая равномерность проявления заданных функциональных свойств. По этой причине микрокапсулирование представляет собой перспективное технологически обоснованное решение, открывающее новые возможности для развития текстильной промышленности по получению материалов с повышенной терморегулирующей способностью [1-5].

Благодаря формирующейся оболочке вокруг активного вещества, ВФП способны поддерживать эффективность в процессах теплообмена на протяжении длительного времени, обеспечивая стабильное регулирование температуры [6-8]. Данная технология обеспечивает долговечность функциональных свойств ВФП, сохраняя их эффективность после многократных процессов термоциклирования, циклов стирки и сушки текстильного материала. Закрепление микрокапсул не снижает качественных показателей текстильных изделий, позволяя интегрировать ВФП в изделия различного назначения [9, 10].

Выбор компонентов для формирования оболочки микрокапсул определяется функциональным назначением текстильного материала, условиями эксплуатации, включая температурный диапазон, в котором активное вещество осуществляет фазовый переход [11]. Это позволяет разрабатывать оболочки с заданными свойствами, такими как упругость и пластичность, а также повышенной твердостью и прочностью, что обеспечивает надежную защиту активного вещества от внешних механических, термических и химических воздействий [12-14].

Процессы инкапсуляции предоставляют возможность интеграции микрокапсул в текстильные изделия различными методами. К ним относятся введение микрокапсул в структуру волокон в процессе электропрядения [15, 16], их фиксация с

использованием связующих [17, 18], пенополимеров [13, 19-21], а также возможность образования ковалентных связей с волокном. Способ закрепления микрокапсул определяется функциональными требованиями к готовому текстильному изделию [22, 23].

МЕТОДЫ ИММОБИЛИЗАЦИИ МИКРОКАПСУЛ НА ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Технологический режим отделки текстильных материалов препаратами на основе микрокапсул должен учитывать свойства текстильной основы (химический состав, природа и структура волокна), эксплуатационные критерии готового материала (устойчивость и функциональность микрокапсул), взаимодействие с другими отделочными препаратами, технологические, экономические и экологические аспекты процесса отделки.

Химическая «пришивка». Использование связующих веществ при иммобилизации микрокапсул на текстильные материалы, несмотря на простоту реализации, может приводить к формированию трехмерной структуры, затрудняющей контролируемое высвобождение активного вещества. Кроме того, отсутствие прочной химической связи между микрокапсулами и текстильными волокнами негативно сказывается на устойчивости к стирке и воздухопроницаемости материала. В случае применения метода печати механическое разрушение микрокапсул под воздействием давления является существенным ограничением. Для преодоления указанных недостатков перспективным подходом является ковалентное связывание микрокапсул с текстильными волокнами, осуществляемое посредством нанесения многофункциональных сшивающих реагентов [24-26]. Данный метод позволяет существенно повысить устойчивость микрокапсул к внешним воздействиям и сохранить функциональные свойства текстильного материала [27, 28].

В литературе описаны различные варианты реализации данного подхода. Продемонстрирована возможность закрепления этилцеллюлозных микрокапсул на хлопковых волокнах с использованием 1,2,3,4-бутантетракарбоновой кислоты, которая образует сложноэфирные связи с гидроксильными группами целлюлозы [29]. Предложено использование диметилдигидроксиэтилмочевины в качестве сшивающего агента для формирования ковалентных связей между гидроксильными группами хитозана и целлюлозы, что значительно повышает устойчивость к стирке и сохранению свойств микрокапсул [30, 31]. Доказана эффектив-

ность применения лимонной кислоты для ковалентной фиксации микрокапсул, оболочка которых содержит хитозан [32].

Другим направлением исследований является модификация поверхности микрокапсул с целью пришивки к волокнам текстильного материала. Использование таких соединений как α -броммакриловая и адипиновая кислоты, 2,4,6-трихлортриазин и дихлорхиноксалин позволяет обеспечить ковалентную фиксацию микрокапсул на натуральных, синтетических или искусственных волокнах [33]. Предложено использование метода "click chemistry" для модификации поверхности полисахаридных волокон (например, целлюлозы) путем введения функциональных групп, которые быстро взаимодействуют с комплементарными группами поверхности микрокапсул, формируя прочные связи [34-36]. Дополнительная температурная или ультразвуковая обработка текстильного материала повышает степень фиксации микрокапсул, закрепленных методом химической "пришивки" [37, 38].

Закрепление микрокапсул на волокнообразующем полимере за счет электростатических взаимодействий. В большинстве рассмотренных методов закрепления микрокапсул происходит образование ковалентных связей между компонентами оболочки и волокнообразующим полимером, либо формирование "сшивок" при нанесении печатного покрытия с использованием, например, акрилатов [39], что может приводить к изменению физико-химических свойств волокон и вызывать их повреждение [40, 41].

Данный подход основан на электростатическом взаимодействии между отрицательно заряженными поверхностями текстильных волокон и положительно заряженными группами компонентов оболочек микрокапсул. Основным преимуществом данного подхода является его универсальность, позволяющая наносить микрокапсулы с различными оболочками, образованные на основе как природных, так и синтетических полимеров, а также капсул, содержащих активные вещества разной природы и назначения (ароматические отдушки, ВФП, антибактериальные агенты и др.), при этом не нарушая физико-механические свойства текстильного материала [42, 43].

Изучена возможность закрепления аминфункционализированных частиц поли(метилметакрилата) на полиамидных волокнах при помощи катионного акрилата со степенью иммобилизации 80%. Процесс сорбции зависит от ионной силы раствора и заряда групп молекул, входящих в структуру оболочек микрокапсул. Повышение значения

pH среды увеличивало разность дзета-потенциалов закрепляемых микрокапсул и волокна, способствуя усилению процесса адсорбции [44].

Формирование дополнительной внешней оболочки. Внешний полимерный слой может быть сформирован либо на этапе микрокапсуляции, либо в последующем процессе, например, путем диспергирования готовых микрокапсул в среде, содержащей мономеры, с последующим проведением суспензионной полимеризации. Такой подход обеспечивает прочное закрепление частиц на текстиле и позволяет сохранить их функциональные свойства, такие как контролируемое высвобождение активных веществ из капсул, высокую устойчивость к физико-механическим воздействиям в процессе эксплуатации [38, 45]. Использование термопластичных полимеров в качестве внешней оболочки микрокапсул позволяет адаптировать метод к различным типам текстильных материалов, что расширяет область его применения в производстве функциональных текстильных изделий различного назначения [46, 47]. Например, микрокапсулы с двухслойной оболочкой, где внешний слой состоит из термопластичных полимеров, таких как полистирол [48] или полиэтилен [49], обладают высокой степенью закрепления на текстильном материале. Это достигается за счет термической обработки, при которой температура повышается до уровня размягчения или плавления термопласта-внешней оболочки капсулы, что позволяет ей внедриться в структуру текстильного волокна [40, 50].

Несмотря на то, что приведенные методы иммобилизации микрокапсул являются эффективными, их реализация ограничена в условиях крупномасштабного производства. Нанесение большинства аппретов в современной текстильной промышленности обычно осуществляется методами пропитки и текстильной печати.

При использовании метода пропитки равномерное распределение частиц на поверхности текстильного материала обеспечивается за счет применения диспергаторов или поверхностно-активных веществ. На финальных стадиях обработки материал подвергают пропитке в растворе синтетического ПАВ, содержащего активные группы, обладающим зарядом противоположным группам на внешнем слое оболочки микрокапсул [51, 52]. Исключением могут быть микрокапсулы, в оболочках которых содержится кремний или соединения на его основе, что значительно затрудняет закрепление таких частиц из-за малой реакционной способности кремния [51, 53]. Подобные микрокапсулы

используются в областях, где применение текстильных материалов или изделий на их основе направлено на повышение комфорта и улучшение самочувствия человека. В этом случае микрокапсулы должны сохранять свою целостность, выдерживая не менее 20 циклов стирки, глажки или машинной сушки, что требует разработки оболочек с повышенной механической и термической устойчивостью [54].

Для закрепления микрокапсул, содержащих ВФП, чаще всего применяется метод печати, который предполагает использование мягчителей и связующих материалов (акриловых, полиуретановых или силиконовых), обеспечивающих образование прочных связей между оболочкой капсул и волокном [55, 56]. В зависимости от выбранного метода функционализации адгезия микрокапсул к текстилю может достигаться благодаря физическим взаимодействиям или образованию химических связей. Для более прочной фиксации микрокапсул на волокне в состав печатной композиции включают сшивающие агенты [57].

Термическая обработка горячим воздухом в процессе сушки является важным этапом в процессе нанесения микрокапсул на волокнистые материалы. При данной обработке происходит удаление остаточной влаги и отверждение полимерной матрицы (смолы или связующего), что обеспечивает прочную адгезию микрокапсул к поверхности волокна. Химическая структура связующего, будь то полимер на основе акрилатов, полиуретанов или других соединений, оказывает прямое влияние на механизм адгезии (например, физическая адсорбция, химическое связывание) и, следовательно, на устойчивость микрокапсул к стирке, истиранию и высоким температурам. Состав печатной композиции играет ключевую роль в эффективности процесса иммобилизации микрокапсул [58, 59]. Известны подходы, в которых соотношения загустителя, связующего и готовой дисперсии капсулированных ВФП в печатном составе, может быть различным. Высокая степень фиксации наночастиц наблюдалась в случае использования композиции, содержащей полимер и дисперсию микрокапсул в соотношениях 1:1, 1:2. Однако количество связующего должно быть строго рассчитано, чтобы гарантировать прочное сцепление микрокапсул с волокнами без нарушения их целостности и высвобождения активного вещества до момента целевого использования [60].

Существуют эластомерные полимерные связующие с температурой стеклования в диапазоне от $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, которые способны к обратимым

высокоэластическим деформациям. Однако применение таких полимеров в печатных составах может приводить к снижению гибкости и воздухопроницаемости текстильных материалов [61].

Применение метода текстильной печати с использованием акриловых загустителей и связующих для получения печатной композиции и в ходе ее нанесения закрепления микрокапсул с ВФП на текстильных материалах является наиболее эффективным благодаря их уникальным свойствам. Основным ограничением метода печати для иммобилизации капсулированных ВФП является низкая устойчивость сформированных покрытий к стирке, обусловленная возможным разрушением адгезионного слоя и недостаточной устойчивостью связующего к гидролизу, механическим воздействиям в процессе стирки. Предложено применение связующих на основе солей и сложных эфиров акриловой и метакриловой кислот [62]. Акриловые связующие или их композиции образуют прочные и эластичные пленки, которые обеспечивают надежное закрепление микрокапсул на поверхности текстиля. Это предотвращает их вымывание и механическое повреждение при эксплуатации. Акриловые загустители позволяют регулировать вязкость печатной пасты, что обеспечивает равномерное распределение микрокапсул и стабильность терморегулирующих свойств [63, 64]. Кроме того, этот метод отличается простотой применения, высокой производительностью и экономичностью, что делает его предпочтительным для промышленного использования.

Метод обработки с использованием плазменных источников высоких энергий. Модификация поверхности текстильных изделий методом плазменной обработки обеспечивает изменение их функциональных свойств, включая рост шероховатости поверхности волокон, а также внедрение полярных функциональных групп, способствующих повышению смачиваемости тканей [65, 66]. Такая модификация повышает адсорбцию микрокапсул на текстиле и их адгезию [67]. Плазменная обработка широко применяется для адаптации поверхностных характеристик текстильных материалов под конкретные задачи, при этом сохраняя их объемные свойства неизменными [68].

Предложен способ с двойной обработкой образцов полиэфирного волокна плазмой атмосферного давления при электрической мощности 750 Вт с частотой 30 кГц в течение двух минут, как для предварительной поверхности текстильных материалов, так и для последующего закрепления микрокапсул с оболочкой, сформированной на основе хитозана и желатина, на них. Показано, что

модифицированный текстиль сохраняет свои функциональные характеристики на протяжении как минимум 10 циклов стирки без повреждения закрепленных микрокапсул [43].

Ультрафиолетовое отверждение. Традиционные методы фиксации, включая термообработку при температурах от 130 до 170 °С в течение 1–10 мин, способствуют образованию ковалентных связей между компонентами связующего вещества и функциональными группами молекул оболочек микрокапсул, что обеспечивает их прочное закрепление на текстильном материале. Однако в случае микрокапсул, содержащих ароматические отдушки, такой процесс может привести к разрушению и потере активных компонентов, что снижает долговечность и интенсивность аромата на ткани. Для решения этой проблемы предложен метод УФ-отверждения при низких температурах для закрепления капсул на хлопчатобумажном материале [69, 70]. Данный подход позволил увеличить срок проявления эффекта ароматизации до 50 циклов стирки, в то время как традиционная термообработка обеспечивала устойчивость таких капсул только в 25 циклах. При нанесении ароматизированных микрокапсул и УФ-смолы на хлопчатобумажную ткань с последующим отверждением в оптимальных условиях, уровень ароматизации сохранялся даже после 50 циклов стирки [71].

ВЫВОДЫ

Технология микрокапсулирования открывает новые перспективы в создании функциональных текстильных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Инкапсулирование активных веществ, в особенности веществ с фазовым переходом, позволяет значительно расширить спектр функциональных свойств текстиля, обеспечивая при этом защиту активных компонентов и пролонгированный эффект. Выбор оптимального материала оболочки, методов иммобилизации и дополнительных видов обработки играет ключевую роль в достижении требуемых эксплуатационных характеристик, долговечности и устойчивости к внешним воздействиям. Дальнейшие исследования в области разработки новых материалов оболочек, совершенствования методов "пришивки" микрокапсул и использования инновационных технологий постобработки, таких как плазменная обработка и УФ-отверждение, позволят расширить возможности применения текстильных материалов с нанесенными микрокапсулами и повысить их конкурентоспособность на рынке существующих функци-

ональных материалов. Комплексный подход к выбору метода нанесения микрокапсул, учитывающий свойства текстильной основы, эксплуатационные требования, экономические и экологические аспекты, является залогом создания высокоэффективных и долговечных функциональных текстильных материалов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-20207.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 25-23-207.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Boh B., Knez E., Staresinic M. // *Journal of microencapsulation*. 2005. V. 22. N 7. P. 715-735. DOI: 10.1080/02652040500162139.
2. Abdel-Aziz E., Bakr M., M. Zayed M., Othman H., Hassabo A.G. // *Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science*. 2022. V. 19. N 2. P. 189-202. DOI: 10.21608/jtcs.2022.140954.1121.
3. Agrawal R., Singh K.D.P., Paswan M.K. // *Materials Today: Proceedings*. 2020. V. 22. P. 1617-1627. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.159.
4. Rahaman T., Khan S.H. // *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2024. P. 100457. DOI: 10.1016/j.joitmc.2024.100457.
5. Palacios A., Navarro-Rivero M.E., Zou B., Jiang Z., Harrison M.T., Ding Y. // *Journal of Energy Storage*. 2023. V. 72. P. 108597. DOI: 10.1016/j.est.2023.108597.
6. Öztürk G., Temis A., Hekimoglu G., Aslan M. // *Journal of Energy Storage*. 2024. V. 84. P. 110911. DOI: 10.1016/j.est.2024.110911.
7. Dong G., Zhao J., Xue D., Zhou L., Liu G., Zhou G. // *Journal of Energy Storage*. 2024. V. 103. P. 114424. DOI: 10.1016/j.est.2024.114424.
8. Shaddel Khalifelu S., Hamid N., Rahimi-Akar Z., Seyedjabedar N., Orouzaden A., Babapoor A., Seyfaee A. // *Reviews in Chemical Engineering*. 2024. V. 40. N 8. P. 951-971. DOI: 10.1515/revce-2024-0007.
9. Kizildag N. // *Woodhead Publishing*. 2023. P. 445-505. DOI: 10.1016/B978-0-323-85719-2.00013-4.
10. Zuo X., Zhang X., Qu L., Miao J. // *Advanced Materials Technologies*. 2023. V. 8. N 6. P. 2201137. DOI: 10.1002/admt.202201137.
11. Li L., Zhu X., Yang B., Zhang H., Liu H., Liu G. // *Journal of Energy Storage*. 2025. V. 108. P. 115121. DOI: 10.1016/j.est.2024.115121.
12. Zhang H., Wang Z., Qiu H., Xu B., Chen K. // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. P. 143018. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.143018.
13. Lobel B.T., Baiocco D., Al-Sharabi M. // *ACS applied materials & interfaces*. 2024. V. 16. N 31. P. 40326-40355. DOI: 10.1021/acsami.4c02462.

14. Lu X., Wang X., Xue D., Zhao T. // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2025. V. 45. P. 102002. DOI: 10.1016/j.scp.2025.102002.
15. Gu B., Li G., Zhang Q., Pan H., Duan M. // *Advanced Functional Materials*. 2025. V. 35. N 1. P. 2412089. DOI: 10.1002/adfm.202412089.
16. Li M., Chi S., Liu C., Liu Y., Huang X. // *Fibers and Polymers*. 2025. P. 1-8. DOI: 10.1007/s12221-025-00916-1.
17. Gong W., Cheng J., Yan W., Zou H., Gao C., Liu X. // *Progress in Organic Coatings*. 2024. V. 192. P. 108530. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108530.
18. El-Zawahry M.M., Kamel M.M., Hassabo A.G. // *Industrial Crops and Products*. 2024. V. 222. P. 119583. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.119583.
19. Aksoy S.A., Özkayalar S., Alkan C. // *Energy Storage*. 2025. V. 7. N 3. P. e70110. DOI: 10.1002/est2.70110.
20. Chen Y., Li F., Cang H., Chen S., Zhang G. // *Journal of Applied Polymer Science*. 2025. P. e57120. DOI: 10.1002/app.57120.
21. Han S., Li J., Lu Y., Zang J., Ding Q., Su J., Wang X. // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. V. 261. P. 129640. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129640.
22. Одинова О.И., Владимирцева Е.Л., Козлова О.В., Петрова Л.С., Липина А.А., Смирнова С.В., Ерзунов К.А., Константинова З.А., Зимнуров А.Р., Быков Ф.А., Мельников А.Г. // *Известия вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. № 7. С. 173-184. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6844j. Odintsova O.I., Vladimirtseva E.L., Kozlova O.V., Petrova L.S., Lipina A.A., Smirnova S.V., Erzunov K.A., Konstantinova Z.A., Zimnurov A.R., Bukov F.A., Melnikov A.G. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 173-184. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6844j. (in Russian).
23. Липина А.А., Петрова Л.С., Одинова О.И., Козлова О.В., Владимирцева Е.Л., Смирнова С.В., Ильичева М.Д. // *Известия вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. № 6. С. 97-104. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6628. Lipina A.A., Petrova L.S., Odintsova O.I., Kozlova O.V., Vladimirtseva E.L., Smirnova S.V., Ilyicheva M.D. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 97-104. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6628. (in Russian).
24. Guignard M.I., Campagne C., Giraud S. // *The Journal of the Textile Institute*. 2015. V. 106. N 2. P. 119-132. DOI: 10.1080/00405000.2014.942115.
25. Xiao Z., Sun P., Liu H., Zhao Q., Niu Y., Zhao D. // *Journal of Controlled Release*. 2022. V. 351. P. 198-214. DOI: 10.1016/j.jconrel.2022.09.017.
26. Elesini U.S., Svark J., Sumiga B. // *Textile Research Journal*. 2017. V. 87. N 20. P. 2435-2448. DOI: 10.1177/0040517516671126.
27. Huang Y., Stonehouse A., Abeykoon C. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023. V. 200. P. 123458. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123458.
28. Javadi F.S., Metselaar H.S.C., Ganesan P. // *Solar Energy*. 2020. V. 206. P. 330-352. DOI: 10.1016/j.solener.2020.05.106.
29. Badulescu R., Vivod V., Jausovec D., Voncina B. // *Carbohydrate Polymers*. 2008. V. 71. N 1. P. 85-91. DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.05.028.
30. Liu J., Liu C., Liu I., Chen M., Hu Y., Yang Z. // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2013. V. 109. P. 103-108. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2013.03.040.
31. Jian C., Li Z., Qin L., Zhou M., Yun Y. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025. V. 715. P. 136644. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2025.136644.
32. Yang Z., Zeng Z., Xiao Z., Ji H. // *Flavour and fragrance journal*. 2014. V. 29. N 2. P. 114-120. DOI: 10.1002/ffj.3186.
33. Zhou L., He H., Li M.C., Huang S., Mei C., Wu Q. // *Carbohydrate polymers*. 2018. V. 189. P. 331-341. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.02.039.
34. Valle J.A.B., Valle R.C.S.C., Bierhalz A.C.K. // *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. V. 138. N 21. P. 50482. DOI: 10.1002/app.50482.
35. Дымникова Н.С., Ерохина Е.В., Кузнецов О.Ю. // *Рос. хим. жс. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 2. С. 3-12. DOI: 10.6060/RCJ.2024682.1. Dymnikova N.S., Erohina E.V., Kusnetsov O.Yu. // *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 2. P. 3-12. DOI: 10.6060/RCJ.2024682.1.
36. Власкина Е.С., Соотц Ю.Н., Липина А.А., Яминзода З.А., Одинова О.И. Способы получения и области применения серицина. // *Рос. хим. жс. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 4. С. 110-122. DOI: 10.6060/rcj.2024684.14. Vlaskina E.S., Soots Yu.N., Lipina A.A., Yaminzoda Z.A., Odintsova O.I. // *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N4. P. 110-122. DOI: 10.6060/rcj.2024684.14.
37. Tian Y., Huang X., Cheng Y., Niu Y., Meng Q., Ma J., Zhao Y., Kou X., Ke Q. // *Journal of Applied Polymer Science*. 2022. V. 139. N 29. P. e52650. DOI: 10.1002/app.52650.
38. Gouveia I.C. // *Polymers for Advanced Technologies*. 2012. V. 23. N 3. P. 350-356. DOI: 10.1002/pat.1877.
39. Tözüm M.S., Alay Aksoy S., Alkan C. // *International Journal of Energy Research*. 2021. V. 45. N 5. P. 7018-7037. DOI: 10.1002/er.6287.
40. Elkalla E., Khizar Z., Tarhini M., Lebaz N. // *Journal of Microencapsulation*. 2023. V. 40. N 3. P. 125-156. DOI: 10.1080/02652048.2023.2178538.
41. Özsevinç A., Alkan C. // *Industrial Crops and Products*. 2023. V. 192. P. 116131. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.116131.
42. Chatterjee S., Salaün F., Campagne C. // *Pharmaceutics*. 2014. V. 6. N 2. P. 281-297. DOI: 10.3390/pharmaceutics6020281.
43. Massella D., Giraud S., Guan J., Ferri-Fabien Salaun A. // *Sustainable Agriculture Reviews 35: Chitin and Chitosan: History, Fundamentals and Innovations*. 2019. P. 303-336. DOI: 10.1007/978-3-030-16538-3_8.
44. Ripoll L., Bordes C., Marote P., Etheve S., Elaissari A., Fessi H. // *Polymer International*. 2012. V. 61. N 7. P. 1127-1135. DOI: 10.1002/pi.4190.
45. Fan F., Zhang W., Wang C. // *Cellulose*. 2015. V. 22. P. 1427-1438. DOI: 10.1007/s10570-015-0567-5.
46. Skurkyte-Papieviene V., Abraitiene A., Sankauskaite A., Rubeziene V. // *Polymers*. 2021. V. 13. N 7. P. 1120. DOI: 10.3390/polym13071120.
47. Butstraen C., Salaün F., Devaux E., Giraud S., Vroman P. // *Polymers*. 2016. V. 8. N 7. P. 267. DOI: 10.3390/polym8070267.
48. Li H., Ma Y., Li Z., Ji J., Zhu Y., Wang H. // *RSC advances*. 2017. V. 7. N 79. P. 50328-50335. DOI: 10.1039/C7RA06851D.
49. Salaün F., Vroman I., Aubry C. // *Powder Technology*. 2009. V. 192. N 3. P. 375-383. DOI: 10.1016/j.powtec.2009.01.018.
50. Salaün F., Devaux E., Bourbigot S., Rumeau P. // *Thermochimica Acta*. 2010. V. 506. N 1-2. P. 82-93. DOI: 10.1016/j.tca.2010.04.020.
51. Massella D., Giraud S., Guan J., Ferri A. // *Environmental Chemistry Letters*. 2019. V. 17. P. 1787-1800. DOI: 10.1007/s10311-019-00913-w.
52. Yu H., Xue C., Qin Y., Wen Y., Zhang L., Li Y. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. V. 623. P. 126733. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126733.

53. Chen K., Zhou J., Che X., Zhao R., Gao Q. // *Journal of colloid and interface science*. 2020. V. 566. P. 401-410. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.01.106.
54. Szafraniec-Szczęsny J., Malgorzata J-H., Odrobinska J., Zapotoczny S. // *Polymers*. 2020. V. 12. N 9. P. 1999. DOI: 10.3390/polym12091999.
55. Tian Y., Huang X., Cheng Y., Niu Y., Ma J., Zhao Yi., Kou X. // *European Polymer Journal*. 2022. V. 167. P. 111089. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111089.
56. Yan X., Zhao W., Wang L. // *Polymers*. 2021. V. 14. N 1. P. 56. DOI: 10.3390/polym14010056.
57. Monllor P., Bonet M.A., Cases F. // *European Polymer Journal*. 2007. V. 43. N 6. P. 2481-2490. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2007.04.004.
58. Nejman A., Cieslak M., Gajdzicki B., Goetzendorf-Grabowska B., Karaszewska A. // *Thermochimica Acta*. 2014. V. 589. P. 158-163. DOI: 10.1016/j.tca.2014.05.037.
59. Golja B., Forte Tavčer P. // *Coatings*. 2022. V. 12. N 5. P. 593. DOI: 10.3390/coatings12050593.
60. Rodrigues S.N., Martins I.M., Fernandes I.P., Gomes P.B., Mata V.G., Barreiro M.F., Rodrigues A.E. Scentfashion. // *Chemical Engineering Journal*. 2009. V. 149. N 1.3. P. 463-472. DOI: 10.1016/j.cej.2009.02.021.
61. Sarier N., Onder E. // *Thermochimica Acta*. 2012. V. 540. P. 7-60. DOI: 10.1016/j.tca.2012.04.013.
62. Sánchez-Silva L., Rodrigues J.F., Romero A., Borreguero A.M., Carmona M., Sanchez P. // *Chemical Engineering Journal*. 2010. V. 157. N 1. P. 216-222. DOI: 10.1016/j.cej.2009.12.013.
63. Nuru A.M., Ahmmed A.S., Gudayu A.D. // *AATCC Journal of Research*. 2025. V. 12. N 1. P. 24723444241288285. DOI: 10.1177/24723444241288285.
64. Madhu C.R. // *Current Physical Chemistry*. 2022. V. 12. N 2. P. 159-170. DOI: 10.2174/1877946812666220301125133.
65. Kert M., Forte Tavcer P., Hladnik A., Spacic K., Puac N. // *Coatings*. 2021. V. 11. N 10. P. 1181. DOI: 10.3390/coatings11101181.
66. Gong W., Cheng J., Pi D., Gao C., Zou H. // *ACS Applied Polymer Materials*. 2024. V. 6. N 18. P. 11457-11464. DOI: 10.1021/acsapm.4c02071.
67. Oliveira F.R., Fernandes M., Carneiro N. // *Journal of Applied Polymer Science*. 2013. V. 128. N 5. P. 2638-2647. DOI: 10.1002/app.38325.
68. Petrova L.S., Yamizoda Z.A., Odintsova O.I., Vladimirtseva E.L., Smirnova A.S., Solov'eva A.A. // *Russian Journal of General Chemistry*. 2021. V. 91. N 12. P. 2758-2767. DOI: 10.1134/s1070363221120549.
69. Zhang X., Zhu M., Wang W., Yu D. // *Progress in Organic Coatings*. 2018. V. 120. P. 10-18. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.03.004.
70. Gu M., Zhang W., Hao S., Liu X., Zhang Z. // *Pigment & Resin Technology*. 2021. V. 50. N 2. P. 129-135. DOI: 10.1108/PRT-02-2020-0011.
71. Li S., Boyter Jr H., Qian L. // *Journal of the Textile Institute*. 2005. V. 96. N 6. P. 407-411. DOI: 10.1533/joti.2005.0116.

Поступила в редакцию 09.07.2025

Принята к опубликованию 11.08.2025

Received 09.07.2025

Accepted 11.08.2025