

ОСОБЕННОСТИ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ЯДРА МИКРОКАПСУЛ*

FEATURES OF FUNCTIONAL SUBSTANCES RELEASE FROM MICROCAPSULE CORE*

В.Ю. ПЕТРУШИНА, А.В. ТРЕГУБОВ, К.А. ЕРЗУНОВ, О.В. КОЗЛОВА, О.И. ОДИНЦОВА
V.Yu. PETRUSHINA, A.V. TREGUBOV, K.A. ERZUNOV, O.V. KOZLOVA, O.I. ODINTSOVA

(Ивановский государственный химико-технологический университет)

(Ivanovo State University of Chemical Technology)

E-mail: lera.petrushina@list.ru

Микрокапсулированные отделочные материалы играют важную роль в разработке функциональных текстильных материалов. В статье рассмотрены различные методы получения микрокапсул, включая физические, химические и физико-химические. Проведен анализ различных технологий иммобилизации микрокапсул на текстильных материалах.

В этом контексте особое внимание уделяется контролю диффузии функциональных веществ через оболочку микрокапсулы. Множество исследований посвящено применению микрокапсул в текстильной промышленности, однако они не описывают процесс высвобождения инкапсулированных материалов или влияние текстильной матрицы на сами капсулы. В статье особое внимание уделяется механизму и кинетике контролируемого высвобождения функциональных веществ из микрокапсул. Установлено, что на скорость высвобождения инкапсулированного материала влияют физические (температура, свет, магнитное поле) и химические (концентрация протонов (рН), окислительно-восстановительный потенциал, ферменты) факторы, называемые триггерами.

Понимание этих процессов имеет фундаментальное значение для разработки функциональных текстильных материалов с пролонгированными свойствами.

Описаны перспективные способы иммобилизации микрокапсул на текстильных материалах, включающие создание на текстильном материале «депо» методом печати, способ Layer-by-Layer и пропитку микрокапсулированными препаратами посредством плюсования.

Представлены области применения микрокапсулированных текстильных вспомогательных веществ от здравоохранения до космических исследований.

Microencapsulated finishing materials play an important role in the development of specialty textiles. This article discusses various methods for producing nanocapsules, including physical, chemical and physicochemical approaches. An analysis of various methods of immobilization of microcapsules on textile materials was carried out.

In this context, special attention is paid to controlling the diffusion of functional substances through the microcapsule shell. Many studies have focused on the use

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер проекта FZZW2023-0008).

of microcapsules in the textile industry, but they do not describe the process of release of encapsulated materials or the effect of the textile matrix on the capsules themselves. The article pays special attention to the mechanism and kinetics of the controlled release of functional substances from microcapsules.

It has been established that the rate of release of the encapsulated material is influenced by physical (temperature, light, magnetic field) and chemical (proton concentration (pH), redox potential, enzymes) factors called triggers.

Understanding of these processes is fundamental to achieving and developing functional textile materials with sustained properties.

Promising methods for the immobilization of microcapsules on textile materials, including the creation of a “depot” on the textile material by printing, the Layer-by-Layer method, and impregnation with microencapsulated preparations by plusing are described.

Applications of microencapsulated textile excipients from healthcare to space exploration are presented.

Ключевые слова: микрокапсула, инкапсулированный материал, активный агент, ядро, оболочка

Keywords: microcapsule, encapsulated material, active agent, core, shell

Введение

В последние десятилетия научные исследования в текстильной промышленности обеспечили переход к новым продуктам и процессам, особенно в области придания текстильным материалам функциональных свойств (антимикробных, огнеупорных, грязе-, водо- и маслоотталкивающих) с учетом экологических и природоохранных требований. Актуальной является разработка текстильных материалов медицинского, парамедицинского и косметического назначения, создание одежды для Арктики и военнослужащих [1]. В связи с этим технологии микрокапсулирования играют важную роль в производстве многофункциональных текстильных материалов с учетом всех экологических норм [2].

Актуальность микрокапсулирования

Микрокапсулирование является перспективной технологией в области создания многофункциональных текстильных изделий. К преимуществам данной технологии относят не только гибкость и универсальность, но и способность защищать активные ингредиенты капсулы от окисления, кислотности, щелочности, высокой температуры, влаги, испарения, а также от взаимодействий с другими соединениями, которые могут привести к полимеризации [3].

Под микроинкапсуляцией понимают процесс включения микронных частиц твердых тел, жидкостей или газов в инертную оболочку, которая изолирует и защищает их от внешней среды [4]. Продукты, полученные этим способом, различаются по морфологии и внутреннему строению. Частицы размером менее 1 мкм известны как наночастицы, нанокапсулы, наносферы, а частицы диаметром 3...800 мкм известны как микрочастицы, микрокапсулы или микросферы. Частицы размером более 1000 мкм называют макрочастицами [5].

Микрокапсулы состоят из двух компонентов: сердцевин и оболочки. В сердцевине содержится активный ингредиент, а оболочка покрывает или защищает сердцевину. Различные типы материалов, такие как активные фармацевтические препараты, белки, пептиды, летучие масла, пищевые материалы, пигменты, красители, мономеры, катализаторы и пестициды, могут быть инкапсулированы с помощью различных типов покрытий или оболочек.

Оболочка микрокапсул имеет толщину от нескольких микрон до нескольких десятков микрон, бывает однослойной или многослойной, эластичной или жесткой в зависимости от свойств пленкообразователя. В качестве пленкообразователей использу-

ются полимерные соединения животного и растительного происхождения: белки (желатин, альбумин, казеин), декстраны, производные целлюлозы (метилцеллюлоза, этилцеллюлоза, карбоксиметилцеллюлоза), природные смолы (камеди, шеллак), синтетические полимеры и олигомеры (полиолефины, поливиниловый спирт, поливинилхлорид, полиакриламид, эпоксидные смолы, полиэфирные смолы, полиамиды, полиорганосилоксаны), парафины и стеарины. В качестве пленкообразователей могут использоваться также металлы, углерод, силикаты и карбиды [6].

Применение новых химических веществ, таких как ароматизаторы, красители, средства от насекомых, противомикробные препараты, стало возможным благодаря микрокапсулированию, которое открывает новые возможности для текстильной промышленности [7]. Проведен ряд исследований, направленных на получение изделий, способных удовлетворить запросы даже самых требовательных клиентов. Результатом этих исследований стали многочисленные коммерческие продукты, которые нашли широкое применение в разных сферах жизни. Товары, которые всего несколько десятилетий назад считались чем-то из области научной фантастики, сегодня можно найти практически на каждом рынке. Наиболее наглядными примерами являются: ароматизированный текстиль, одежда с поли- и термохромными микрокапсулами, военная форма с микрокапсулированными инсектицидами, лыжные куртки и перчатки с терморегуляцией [8].

Способы формирования микрокапсул

На сегодняшний день формирование микрокапсул осуществляется физическими, химическими и физико-химическими методами [9].

Суть физических методов микрокапсулирования заключается в механическом нанесении материала оболочки на твердые или жидкие частицы капсулируемого вещества, а формирование оболочки зависит от фазового перехода жидкость–твердое тело.

К физическим методам относятся:

- дражирование;

- нанесение покрытий в кипящем слое;
- метод вакуумного осаждения или гальванизации;
- распылительная сушка;
- коэкструзия;
- формирование капсул аппаратом Шерера.

Химические методы микрокапсулирования основаны на образовании защитных покрытий вокруг ядра капсулы в результате полимеризации или поликонденсации пленкообразующих компонентов. Процесс протекает в жидкой среде, начальной стадией является получение эмульсии или суспензии. При капсулировании жидких веществ методом поликонденсации один из мономеров растворяют в фазе капсулируемого вещества, а для получения менее проницаемых оболочек в состав мономеров вводят сшивающие агенты [10]. Химические методы включают в себя межфазную полимеризацию [11], полимеризацию *in situ* [12], сшивку (прошивка–затвердевание) и золь-гель инкапсуляцию.

Физико-химические методы микрокапсулирования основаны на фазовом разделении в системе жидкость–жидкость. Помимо своего разнообразия они отличаются простотой аппаратного оформления, высокой производительностью, возможностью заключать в оболочку лекарственные вещества в любом агрегатном состоянии (твердое вещество, жидкость, газ). К основным физико-химическим методам относятся: упаривание летучего растворителя, ионотропное гелеобразование, последовательная адсорбция, экстракционное замещение, охлаждение распылением [13], осаждение пленкообразователем [14], коацервация [15].

Способы достижения контролируемого высвобождения

Микрокапсулы для доставки активного ядра могут быть сконструированы таким образом, чтобы обеспечить замедленное или быстрое стимул-индуцированное высвобождение инкапсулированных препаратов. Высвобождение активного агента всегда было сопряжено с трудностями, поскольку многие из них нестабильны при ис-

пользовании в свободной форме из-за чувствительности к окислению, свету, влаге или из-за своей летучести. Поэтому изготовление систем на текстильной основе для контролируемого высвобождения активного агента является сложным процессом, который требует выполнения многочисленных условий, таких как эффективная защита инкапсулированного материала, его доступность и высвобождение с контролируемой скоростью, а также эффективное встраивание микрокапсул в текстильную подложку [16].

Контролируемое высвобождение подразумевает менее частое и более эффективное использование доставленного активного агента. Цель систем контролируемого высвобождения состоит в том, чтобы сделать агент доступным при определенной скорости и продолжительности для получения желаемого эффекта. Выпуск может быть направлен таким образом, чтобы активное вещество высвобождалось в определенном месте [17].

Для достижения контролируемого высвобождения лекарственного средства с определенным профилем высвобождения широко используются микрокапсулы, внутри которых находится лекарственное средство. Контролируемое высвобождение лекарственного средства обладает значительными клиническими преимуществами, такими как сокращение частоты дозирования, большее удобство для пациентов, а также локализация лекарственного средства, что приводит к более высокой эффективности, низкой себестоимости и простоте реализации [18].

В связи с этим системы, способные инкапсулировать лекарство и высвободить его только под воздействием определенных стимулов, являются высоко востребованными для целей повышения эффективности действия микрокапсул.

Созданы микрокапсулы, заполненные $H_2O_2-H_2O$, для использования в качестве материала для контролируемой доставки O_2 в клетки человека путем пропитки салфеток соответствующим составом. Микрокапсулы из полиметилметакрилата диаметром

в диапазоне 5...30 мкм синтезировали методом выпаривания эмульсионного растворителя без использования воды. Высвобождение микрокапсул, нагруженных H_2O_2 , *in vitro* показало, что около 70% H_2O_2 высвобождается за 24 часа [18]. В другом исследовании микрокапсулы, содержащие хлоргексидина диглюконат в качестве гидрофильного антисептического агента, успешно получены с использованием контролируемого нанопреобразования на капли миниэмульсии "вода в масле". В зависимости от количества используемого поверхностно-активного вещества получены микрокапсулы с размером от 80 до 240 нм. Установлено, что контролируемое высвобождение антисептика из микрокапсул может обеспечить лекарственным средством бактерии, ассоциированные с кожей [19].

Важнейшими компонентами процессов высвобождения лекарства являются его активное вещество и носитель. Носитель обычно представляет собой полимер, который позволяет транспортировать активное вещество в определенное место организма человека [19].

В связи с этим текстильные материалы являются очень удобными для местного применения в различных медицинских целях. Существенным преимуществом текстильных материалов является их гибкость, что облегчает применение на любом участке тела [20].

Дизайн текстильных материалов, предназначенных для контролируемого высвобождения активных агентов, может быть классифицирован в зависимости от включения активного агента в субстрат. Включение активных веществ (почти исключительно лекарств) непосредственно в структуру волокна или ткани может быть реализовано несколькими способами.

Микрокапсулы могут быть нанесены на волокна или ткани путем пропитки, окрашивания пряжи, ионного обмена, погружения распылением, замачивания, прокатки и т. д. [21]. При использовании комплексных нитей структуры «ядро/оболочка» возможно включение лекарства в оболочку непосредственно в процессе получения синтетиче-

ского волокна из расплава [22] или путем добавления активного агента в ядро [23].

Другим методом получения волокон, содержащих лекарственные вещества, является совместное смешивание активного вещества (агента) и филаментообразующего материала для приготовления прядильных жидкостей, которые позже скручивают в волокна [22].

Применение отделочных или повязочных материалов с активным веществом в виде пленки на текстильной поверхности особенно актуально при заживлении ран, лечении кожных заболеваний и повреждениях кожи. Пленка с активным веществом может быть нанесена на текстильную структуру путем печати или пропитки [24].

Системы доставки лекарств на текстильной основе могут быть включены в медицинские изделия с лекарственным покрытием, такие как сосудистые трансплантаты малого диаметра и стенты, предназначенные для регенерации тканей и нервов [25].

Текстильные изделия, предназначенные для использования в конкретной биологической среде, где их активность зависит от взаимодействия с клетками организма и биологическими жидкостями, называются биотекстилем [26].

Механизмы высвобождения ядра микрокапсулы

Контролируемое высвобождение активного ингредиента из капсул вызывает все больший интерес относительно их применения при доставке лекарств, сохранении питательных веществ, выделении ароматических веществ и изготовлении самовосстанавливающихся материалов. Запуск высвобождения содержимого капсулы является процессом, зависящим от раздражителей, поэтому разработка соответствующих инициаторов играет ключевую роль в обеспечении желаемого результата. Для высвобождения содержимого капсулы разработаны различные химические и физические методы [27].

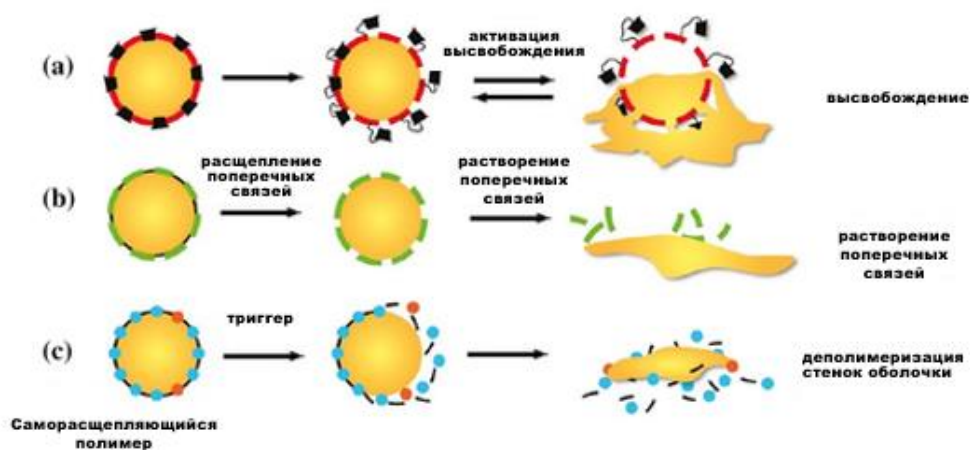


Рис.1

Под физическими стимулами подразумеваются внешние физические факторы, которые могут влиять как на физико-химическое состояние макромолекул в оболочке капсулы, так и на стабильность ковалентных связей. Основными физическими стимулами являются температура, свет и магнитное поле [28, 29]. Химические стимулы связаны с изменением состава среды. Типичными химическими стимулами являются концентрации протонов (pH) [30], присутствие глутатиона (окислительно-

восстановительный потенциал) [31] и ферментов [32]. Химические методы высвобождения сердцевин капсулы были определены как триггер, который вызывает химические реакции с материалом оболочки, включая открытие пор в оболочке с помощью механизма переключения [33], химическое расщепление встроенных поперечных связей, приводящее к разложению оболочки [34] и процессу осаждения, при котором триггеры инициируют деполимеризацию оболочки капсулы (рис. 1 – химичес-

кие механизмы инициирования высвобождения капсулированного препарата) [35].

Разработаны физические методы, поскольку преобладают фазовые переходы и/или механизмы дезинтеграции, включая разрыв оболочки капсулы при увеличении внутреннего давления [36], изменение фазы

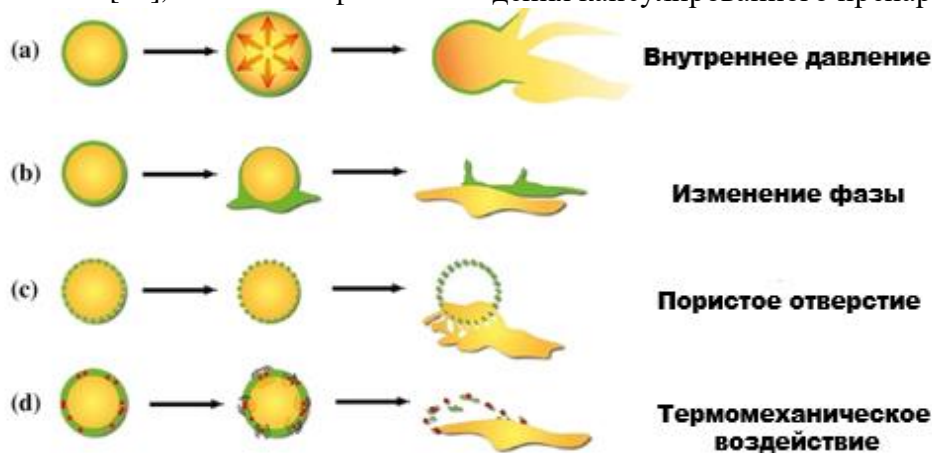


Рис. 2

Способность некоторых полимеров претерпевать фазовый переход при небольшом изменении температуры позволяет создавать термочувствительные системы доставки лекарств. Возникновение термочувствительного поведения полимеров возможно вследствие уникального баланса гидрофильных, заряженных и гидрофобных групп, которые присутствуют в макромолекулах [38]. Соответственно, химические модификации термочувствительных полимеров позволяют варьировать средние температуры их фазового перехода с целью достижения оптимальных значений.

Термочувствительные полимеры чаще всего составляют основу физически или химически сшитых частиц или гелей, которые могут изменять свой объем или претерпевать золь-гель переход. Общая идея термочувствительного эффекта заключается в ускорении высвобождения лекарства из полимерной матрицы, вызванном резким переходом золь-гель или гель-золь при изменении температуры. Для полимеров отрицательная температурная реакция приводит к сжатию полимерных цепей, что способствует выталкиванию лекарства из полимерной матрицы. Таким образом, высвобождение инкапсулированного лекарства

при плавлении полимерной оболочки, изменение пористости оболочки капсулы в результате фазового перехода полимера оболочки [37] и термомеханическое разрушение оболочки капсулы (рис. 2 – физические механизмы инициирования высвобождения капсулированного препарата) [37].

при повышенных температурах обычно происходит с более высокой скоростью [39].

Быстрое высвобождение ядра микрокапсулы приводит к изменению физических или химических свойств светочувствительных полимеров, когда они подвергаются воздействию света, что в свою очередь может привести к увеличению и/или уменьшению ядра светочувствительного полимера. Световые стимулы имеют свои особенности: простота применения и отсутствие контакта с телом, а также возможность контролировать время и количество воздействий [40]. Для проявления полимером фоточувствительных свойств необходимо наличие в его структуре хромофорной группы, которая претерпевает обратимое или необратимое изменение структуры [41].

Молекулярные переключатели, называемые также обратимыми хромофорами, – это молекулы, в которых происходит молекулярное переключение между двумя фотостационарными состояниями. Азобензол является примером хромофора, который чередует плоскую транс- и изогнутую цис-конформации за счет фотоиндуцированной изомеризации двойной связи $-N=N-$. Избирательно возбуждая транс- или цис-конформацию, можно добиться фотоизомеризации, обратимо изме-

няя конформацию полимерной цепи носителя. Таким образом, можно изменять гидродинамические размеры носителя и использовать их для регулирования диффузии инкапсулированного вещества.

Необратимые хромофоры применяют в качестве компонентов с целью получения полимерных конструкций, которые способны к стимул-индуцированному высвобождению лекарств. Преимуществом необратимых хромофоров является возможность полного фотопреобразования без равновесия между двумя состояниями. Расщепление фотокомпонента приводит к уменьшению молекулярной массы или увеличению растворимости макромолекул [42]. Это в свою очередь приводит к более быстрой диффузии молекул лекарственного средства из полимерной матрицы. Необратимые хромофоры можно найти в фотолabileных группах, к которым относятся о-нитробензильные и кумарин-4-илметильные производные, пиренилметильные и 2-нафтохинон-3-метиды [43].

Изменение концентрации протонов в системе можно рассматривать как один из химических стимулов, запускающих высвобождение лекарственных средств. Стимулирование внутриклеточного высвобождения лекарственных средств может быть достигнуто путем использования полимерных носителей, которые увеличивают скорость высвобождения в зонах с высоким протонным числом и внутриклеточным высвобождением лекарственных средств [41]. рН-чувствительные носители, способные распределять реактивные формы кислорода, обычно создаются путем добавления рН-чувствительных полимеров или альтернативных низкомолекулярных линкеров, способных разрушаться в ответ на увеличение или уменьшение концентрации протонов в системе. Полиэлектролиты, содержащие слабокислые или основные группы, могут принимать или отдавать протоны в ответ на изменение рН среды. рН-чувствительные полимеры демонстрируют значительные конформационные изменения при изменении рН, что приводит к незначительному преобразованию структуры полимера по сравнению с одним химическим суб-

стратом [44]. рН-чувствительные полимеры, как правило, имеют слабые кислотные или основные группы (карбоксильные или аминогруппы соответственно). Типичными примерами слабых рН-чувствительных полианионов являются полиакриловая кислота, альгиновая и гиалуроновая кислоты [45], которые имеют тенденцию набухать при значениях рН выше константы диссоциации их COOH -группы. Таким образом, они могут улучшить условия для распространения лекарственного средства, предотвращая или обеспечивая быстрое высвобождение инкапсулированного лекарственного средства в кислых или основных условиях [46]. К слабым поликатионам можно отнести поли(N, N-диалкиламиноэтилметакрилаты), поли(L-лизин), полиэтиленмин и хитозан [47]. Такие полиэлектролиты имеют тенденцию к набуханию в кислой среде ниже их рН вследствие эффективного протонирования неспаренных электронов азота, которые обеспечивают положительный заряд макромолекулярной цепи. Гидродинамические размеры макромолекул полимера увеличиваются за счет отталкивания заряда. Такие катионные полимеры могут быть использованы для транспортировки лекарств в области с кислым рН, например, в опухолевые ткани [48] или очаги воспаления [49].

В зависимости от применения микрокапсул могут быть выбраны различные химические и физические механизмы высвобождения содержимого ядра. Проведено множество исследований, направленных на химические методы активации высвобождения содержимого лекарственного средства из капсул. Скорость высвобождения лекарства зависит от нескольких параметров, включая растворимость лекарства в среде высвобождения, взаимодействие лекарства с полимером, соотношение объема лекарственного средства и размера капсулы. Ионная сила, рН, температура и наличие биологических компонентов, таких как белки, липиды и клетки, а также состояние среды высвобождения лекарственного средства влияют на растворимость лекарственного средства [47].

Микротрещины как физический механизм являются эффективным триггером разрыва полимерных капсул в самовосстанавливающихся материалах [50]. Микротрещины распространяются по композитной матрице и сталкиваются с микрокапсулами, легко вызывают их разрыв, таким образом высвобождая активные вещества вдоль поверхности трещины. Затем вещества вступают в реакцию друг с другом и оказывают лечебное действие на поврежденную область организма [51]. Оптимальное сочетание механических свойств оболочки из полимера и полимерной матрицы важно для обеспечения механического срабатывания при растрескивании композита [52].

Очень жесткая оболочка микрокапсулы не может легко разорваться и предотвращает высвобождение заживляющего вещества. С другой стороны, когда оболочка капсулы слишком тонкая, заживляющее вещество может быть потеряно внутри полимерной матрицы даже без каких-либо микротрещин.

Шероховатость поверхности микрокапсул также способствует лучшему взаимодействию между оболочкой капсулы и композитной матрицей в направлении их разрыва и высвобождения заживляющих веществ в поврежденных областях. Единственным недостатком микрокапсул при их применении является гладкая морфология поверхности, которая иногда может уменьшить физическое/химическое взаимодействие микрокапсул с полимерной матрицей [53].

Преодоление этой проблемы возможно путем преобразования поверхности микрокапсул химическими модификаторами, которые могли бы более эффективно взаимодействовать с матрицей. Химическая модификация поверхности микрокапсул с использованием связующих веществ является одним из эффективных подходов к улучшению свойств поверхности [50].

Методики иммобилизации микрокапсул на текстильный материал

Существуют различные методики иммобилизации микрокапсул в текстильные

структуры, к которым можно отнести: создание на текстильном материале «депо» методом печати, способ Layer-by-Layer и пропитка микрокапсулированными препаратами посредством плюсования.

С использованием первой технологии иммобилизации осуществляется получение лечебных материалов (например, аппликаций и салфеток), которые обладают важным свойством – продолжительным лечебным и профилактическим эффектом. Это возможно благодаря способу распределения вещества на текстильном материале. Загуститель, добавленный в состав материала, служит своеобразным «хранилищем» или «депо» для лекарственного препарата, а сам текстильный материал является «двойным хранилищем» или «двойным депо» для лекарства, так как композиция с препаратом равномерно распределяется как внутри, так и на поверхности материала. Именно этот эффект «двойного хранилища», достигаемый с помощью выбранной технологии нанесения, обеспечивает пролонгацию лекарственного препарата из лечебного текстильного материала (например, аппликаций и салфеток) во внешнюю среду (например, на рану) [54].

Еще один метод для иммобилизации микрокапсул подразумевает заключение функционального вещества между слоями полиэлектролитов с противоположными зарядами. Это позволяет создать на ткани структуру типа "сэндвич", которая обеспечивает длительное высвобождение активного вещества [9]. Использование микрокапсулированного активного вещества и его иммобилизация на ткани с помощью метода Layer-by-Layer являются наиболее перспективными [55]. Этот метод основан на последовательной адсорбции противоположно заряженных макромолекул полиэлектролита из водных растворов на плоскую поверхность. Синтезированные полиэлектролитные слои защищают нанесенные на текстильный материал активные ингредиенты от окисления, повышения температуры, кислотности, щелочности, влаги и испарения, а также от взаимодействия с другими соединениями [56].

В большинстве систем для нанесения микрокапсул на текстиль требуется связующее. Оно фиксирует микрокапсулы на текстильных материалах, образуя пленку, состоящую из макромолекул с длинной цепью, которые образуют трехмерно связанную сеть [57]. В качестве связующего могут быть использованы такие вещества, как крахмалы, карбоксиметилцеллюлоза, поливиниловый спирт, ксантаны, стирол-бутадиен, поливинилацетат или акрилатлатексы, аминоальдегидные смолы, силиконы и т. д. [58]. Их использование позволяет добиться прочной фиксации на материале, а также устойчивости к стирке и ношению. С другой стороны, они часто могут препятствовать высвобождению активного агента. Чтобы решить эту проблему, микрокапсулы могут быть ковалентно связаны с текстильной подложкой с помощью сшивающих агентов с двумя и более функциональными группами.

Применение микрокапсул в текстильной промышленности

В последние годы ассортимент продукции, содержащей микрокапсулированные материалы, существенно вырос и включает в себя различные текстильные материалы, клеи, катализаторы, удобрения, красители и растворители, кормовые продукты, инсектициды, косметику, товары бытовой химии, ферменты, фотоматериалы. Спектр практического применения микрокапсулированных веществ очень широк – от здравоохранения до космических исследований [59].

Методом микрокапсулирования могут быть получены следующие виды текстильных материалов:

- Текстильные материалы, содержащие микрокапсулы фреона. Этот материал не воспламеняется и может быть использован для пошива спецодежды для пожарных и работников спецслужб.

- Текстильные материалы с антимикробными свойствами. Бактерии часто вызывают микробиологическое разложение волокон, что приводит к потере различных полезных свойств волокон. Предотвратить эту проблему можно с помощью антимикробных покрытий, получаемых методом

микрокапсулирования. Этот процесс специально разработан для медицинских и технических применений. Такие материалы используются в одежде для медицинского персонала, средствах личной гигиены, фильтрах кондиционеров.

- Самоочищающиеся материалы, которые самостоятельно расщепляют органические соединения, устраняют запахи и дезинфицируют поверхности при воздействии на них солнечного света или воды. Область применения – медицинская одежда и материалы, обивка мебели в общественных местах. Функция самоочистки не имеет срока годности [60].

- Фотохромные и термохромные микрокапсулы. Те, что изменяют цвет в зависимости от температуры, называются термохромными, а те, которые изменяют цвет под воздействием ультрафиолетового излучения, – фотохромными. В текстильной промышленности фотохромные и термохромные микрокапсулы используются в маркировке медицинских и защитных изделий.

- Ароматизированный текстильный материал с длительным сроком службы. Технология получения микрокапсул, содержащих эфирные масла (например, лаванды, розмарина, сосны), широко используется в ароматерапии для лечения бессонницы, головных болей, а также для предотвращения неприятных запахов.

- Микрокапсулированные текстильные материалы используются в производстве изделий, оказывающих терапевтическое воздействие на организм человека (постельное белье насыщает организм витамином С).

- Фазопереходные материалы служат для изменения твердого состояния в жидкое в определенном диапазоне температур. Микрокапсулы с фазовым переходом снижают воздействие резких перепадов температуры. Это облегчает терморегуляцию одежды и обеспечивает постоянную температуру. Микрокапсулы такого типа применяются в различных материалах, жилетах, парках, зимних комбинезонах, одеялах и матрасах.

Таким образом, области применения модифицированных текстильных материалов весьма разнообразны, а технология микрокапсулирования позволяет иммобилизовать функциональные вещества на текстильных материалах.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены способы получения микрокапсул с помощью различных методик.

Наибольший интерес представляет контроль диффузии функционального вещества через оболочку микрокапсулы. Рассмотрен механизм и кинетика контролируемого выпуска функционального инкапсулированного вещества оболочкой при действии разных факторов (свет, температура, pH среды).

Процесс контролируемого высвобождения функциональных веществ имеет основополагающее значение при разработке текстильных материалов с пролонгированными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Одинцова О.И., Петрова Л.С., Козлова О.В.* Микрокапсулирование биологически активных веществ и их использование для функционализации текстильных материалов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2018. № 4. С. 85...89.
2. *Ashrafizadeh M., Mirzaei S., Gholami M.H.* Hyaluronic acid-based nanoplatfoms for Doxorubicin: A review of stimuli-responsive carriers, co-delivery and resistance suppression // Carbohydrate Polymers. 2021. V. 272. P. 118491.
3. *Кузьменко В.А., Одинцова О.И., Русанова А.И.* Применение синтетических полиэлектролитов для иммобилизации душистых веществ на текстильных материалах методом «Layer-by-layer» // Известия вузов. Химия и хим. технология. 2014. № 57(6). С. 102...104.
4. *Jingyi Xue, Yangchao Luo.* Protein-polysaccharide nanocomplexes as nanocarriers for delivery of curcumin: a comprehensive review on preparation methods and encapsulation mechanisms // Journal of Future Foods. 2023, V. 3. P. 99...114.
5. *Bajac J., Nikolovski B., Lončarević I. etc.* Microencapsulation of juniper berry essential oil by spray drying: Microcapsule characterization and release kinetics of the oil // Food Hydrocolloids. 2022. V. 125. P. 107430.
6. *Гочжун Ц., Ин В.* Наноструктуры и наноматериалы. Синтез, свойства и применение // Научный мир. 2022. С. 520.

7. *Tariq Z., Izhar F., Malik M.H. etc.* Development of functional textile via microencapsulation of peppermint oils: a novel approach in textile finishing // Research Journal of Textile and Apparel. 2022, P. 3...8.

8. *Valle J.A.B., Valle R.d.C.S.C., Bierhalz A.C.K. etc.* Chitosan microcapsules: methods of the production and use in the textile finishing // Journal of applied polymer science. 2021. V. 138. P. 29.

9. *Huzum B., Puha B., Necoara R. etc.* Biocompatibility assessment of biomaterials used in orthopedic devices // Experimental and Therapeutic Medicine. 2021. V. 22. N. 5. P. 1315.

10. *Nguyen P., Vo T., Tran T. etc.* Encapsulation efficiency and thermal stability of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oil microencapsulated by the spray-drying process // Journal of Food Research. 2021. V. 5. P. 195...202.

11. *Grgic J., Selo G., Planinic M. etc.* Role of the Encapsulation in Bioavailability of Phenolic Compounds // Antioxidants (Basel). 2020. V. 9. P. 9239.

12. *Семкина О.А., Джавахян М.А., Белошанкина О.М., Громакова А.И.* Технологические аспекты получения микрокапсул субстанций растительного происхождения // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2021. V. 24. С. 14.

13. *Лысова М.А., Грузинцева Н.А., Гусев Б.Н.* Установление нормативных значений показателей качества нетканых полотен из полиэфирных волокон по величинам деформации // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 98...103.

14. *Буркитбай А., Сатаева В.М.* Разработка полимерной композиции для защиты текстильного материала от биоповреждений // Вестник АТУ. 2020. V. 3. P. 43...46.

15. *JyothiSri S.* Microencapsulation: A review // International Journal of Pharma and Bio Sciences. 2012. V. 3. N. 1. P. 509...531.

16. *Nelson G.* Microencapsulation in textile finishing // Review of Progress in Coloration and Related Topics. 2022. V. 31. N. 1. P. 57...64.

17. *Son K., Yoo D.I., Shin Y.* Fixation of vitamin E microcapsules on dyed cotton fabrics // Chemical Engineering Journal. 2014. V. 239. P. 284...289.

18. *Himmelsten K.J.* Controlled Release: A Quantitative Treatment // Springer Science & Business Media. 2012. V. 1. P. 1...26.

19. *Feuser P.E., Bubniak L.D.S., Bodack C.D.N. etc.* // J. Nanoscience. Nanotekhnologiya. 2016. V. 16. N. 7. P. 7669.

20. *Kundu D., Hazra C., Chatterjee A. etc.* Extracellular biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using *Rhodococcus pyridinivorans* NT2: multifunctional textile finishing, biosafety evaluation and in vitro drug delivery in colon carcinoma // J Photochem Photobiol B. 2014. V. 140. P. 194...204.

21. *Asare E.O., Mun E.A., Marsili E., Paunov V.N.* Nanotechnologies for control of pathogenic microbial biofilms // Journal of Materials Chemistry B. 2022. V. 10. P. 5129...5153.

22. *Zhu L.-M., Yu D.G.* Biotextiles as Medical Implants // Woodhead Publishing Series in Textiles. 2013. P. 213...231.
23. *Амджад М.В.* Дендримеры в таргетной доставке противоопухолевых препаратов: достижения, проблемы и перспективы дальнейших исследований // Фармация и фармакология. 2021. Т. 9. № 1. С. 4...16.
24. *Maleki M., Amani-Tehran M., Latifi M., Mathur S.* Drug release profile in core-shell nanofibrous structures: a study on Peppas equation and artificial neural network modeling // Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2014, V. 113. P. 92...100.
25. *Gerhardt L.-C., Lottenbach R., Rossi R.M., Derler S.* Tribological investigation of a functional medical textile with lubricating drug-delivery finishing // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2013. V. 108. P. 103...109.
26. *Zhou Y., Lou L., Fan J. et al.* Quantitative Comparison of Personal Cooling Garments in Performance and Design: A Review // Processes. 2023. V. 11. N. 10. P. 2976.
27. *Reis D.R., Ambrosi A., Di Luccio M.* Encapsulated essential oils: A perspective in food preservation // Future Food. 2022. V. 5. P. 100126.
28. *Esser-Kahn A.P., Odom S.A., Sottos N.R. etc.* Triggered Release from Polymer Capsules // Macromolecules. 2011. V. 44. N. 14. P. 5539.
29. *Liu K.H., Liu T.Y., Chen S.Y.* Drug release behavior of chitosan–montmorillonite nanocomposite hydrogels following electrostimulation // Acta Biomaterial. 2008. V. 4. N. 4. P. 1038...1045.
30. *Zheng C., Zhang X. G., Sun L.* Biodegradable and redox-responsive chitosan/poly(L-aspartic acid) submicron capsules for transmucosal delivery of proteins and peptides // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. 2013. V. 24. N. 4. P. 931...939.
31. *Samrot A.V., Sean T.S., Kudaiyappan T.* Production, characterization and application of nanocarriers made of polysaccharides, proteins, bio-polyesters and other biopolymers: A review // International Journal of Biological Macromolecules. 2020. V. 165. P. 3088...3105.
32. *Woraphatphadung T., Sajomsang W., Gonil P.* pH-Responsive polymeric micelles based on amphiphilic chitosan derivatives: Effect of hydrophobic cores on oral meloxicam delivery // International journal of pharmaceuticals. 2016. V. 497. N. 2. P. 150...160.
33. *Silva N.C., Silva S., Sarmento B.* Chitosan nanoparticles for daptomycin delivery in ocular treatment of bacterial endophthalmitis // J. Drug development and industrial pharmacy. 2015. V. 1. P. 109.
34. *Ермаков А.В., Ленгерт Е.В., Венинг С.Б.* Стратегии в области наномедицины и доставки лекарств для применения в тераностике // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. V. 20. P. 116...124.
35. *Ahmed S., Alhareth K., Mignet N.* Advancement in nanogel formulations provides controlled drug release // International Journal of Pharmaceuticals. 2020. V. 584. P. 119435.
36. *Евдокимов И.А., Хайруллин Р.Р., Перфилов С.А. и др.* Наноструктурный композиционный материал, модифицированный графеноподобными частицами // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2020. Т. 63. № 12. С. 37...43.
37. *Sankaranarayanan J., Mahmoud E.A., Kim G. etc.* Inflammation Responsive Logic Gate Nanoparticles for the Delivery of Proteins // Bioconjugate chemistry. 2010. V. 4. N. 10. P. 5930.
38. *Lu Z., Prouty M.D., Guo Z. etc.* // Langmuir. 2005. V. 21. N. 5. P. 2042.
39. *Ward M.A., Georgiou T.K.* Thermoresponsive Polymers for Biomedical Applications // Polymers. 2011. V. 3. N. 3. P. 1215...1242.
40. *Bordat A., Boissenot T., Nicolas J.* Thermoresponsive polymer nanocarriers for biomedical applications // Advanced Drug Delivery Reviews. 2019. V. 138. P. 167...192.
41. *Xiong X., Campo A., Cui J.* Photoresponsive Polymers // Smart Polymers and their Applications. 2019. V. 1. P. 87...153.
42. *Смирнова К.В., Шутов Д.А., Иванов А.Н. и др.* Плазменно-растворный синтез никельсодержащих порошков под действием тлеющего разряда постоянного тока // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. № 7. С. 28...34.
43. *Liu J., Huang Y., Kumar A.* pH-Sensitive nanosystems for drug delivery in cancer therapy // Biotechnology Advances. 2014. V. 32. N. 4. P. 693...710.
44. *Arumugam S., Popik V. V. Arumugam S.* Light-Induced Hetero-Diels–Alder Cycloaddition: A Facile and Selective Photoclick Reaction // Journal of the American Chemical Society. 2011. V. 133. N. 14. P. 5573...5579.
45. *Rizwan M., Yahya R., Hassan A.* pH Sensitive Hydrogels in Drug Delivery: Brief History, Properties, Swelling, and Release Mechanism // Material Selection and Applications. Polymers. 2017, V. 9. N. 12. P. 137.
46. *Полковникова Ю.А., Северинова Н.А., Корянова К.Н. и др.* Морфологические, технологические и биофармацевтические исследования альгинат-хитозановых микрокапсул с винпоцетином // Фармация и фармакология. 2019. V. 7. N. 5. P. 279...290.
47. *Rizwan M., Yahya R., Hassan A.* pH Sensitive Hydrogels in Drug Delivery: Brief History, Properties, Swelling, and Release Mechanism Material Selection and Applications // Polymers. 2017. V. 9. N. 12. P. 137.
48. *Sabourian P., Tavakolian M., Yazdani H.* Stimuli-responsive chitosan as an advantageous platform for efficient delivery of bioactive agents // Journal of Controlled Release. 2020. V. 317. P. 216...231.
49. *Zhang X., Yang X., Ji J.* Tumor targeting strategies for chitosan-based nanoparticles. Colloids Surfaces B // Biointerfaces. 2016. V. 148. P. 460...473.
50. *Суров О.В., Воронова М.Л., Рублева Н.В. и др.* Синтез и свойства конъюгатов нанокристаллической целлюлозы с активными красителями // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2021. Т. 64. № 2. С. 10...18.

51. Bindu S., Mazumder S., Bandyopadhyay U. Non-steroidal antiinflammatory drugs and organ damage: A current perspective // *Biochemical pharmacology*. 2020. V. 114147. P. 36...91.
52. Olewnik-Kruszkowska E. Biodegradation of polylactide-based composites with an addition of a compatibilizing agent in different environments // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2020. V. 147. P. 104840.
53. Saifullah M., Islam Shishir M.R., Ferdowsi R. etc. Micro and nano encapsulation, retention and controlled release of flavor and aroma compounds: A critical review // *Trends Food Sci. Technol.* 2019. V. 86. P. 230...251.
54. Bychkova E.S. Trends in the development of microcapsulation technology // *Food industry*. 2021. V. 4. P. 36...41.
55. Weldrick P.J., Wang A., Halbus A.F., Paunov V.N. Emerging nanotechnologies for targeting antimicrobial resistance // *Nanoscale*. 2022. V. 14. P. 4018...4041.
56. Шилова С.В., Миргалеева Г.М., Волкова М.В. и др. Биосовместимые системы доставки антибиотика цефотаксима на основе гелевых микрочастиц альгината кальция // *Вестник Технологического университета*. 2021. С. 56...59.
57. Weldrick J., Hardman M.J., Paunov V.N. Smart active antibiotic nanocarriers with protease surface functionality can overcome biofilms of resistant bacteria // *Materials Chemistry Frontiers*. 2021. V. 5. P. 961...972.
58. Hsu S., Xu J., Lin S.-H., Wu S.-D., Cheng Q.-P., Wong P.-W. Creative transformation of biomedical polyurethanes: from biostable tubing to biodegradable smart materials // *Journal of Polymer Research*. 2022. V. 29. P. 70.
59. Буданова Г.Н. Инновационные технологии в производстве новых текстильных материалов // *Актуальные вопросы развития инновационной деятельности в новом тысячелетии*. 2014. № 9. С. 10...12.
60. Nelson G. Microencapsulation in textile finishing // *Review of Progress in Coloration and Related Topics*. 2022. V. 31. N. 1. P.57...64.
4. Jingyi Xue, Yangchao Luo. Protein-polysaccharide nanocomplexes as nanocarriers for delivery of curcumin: a comprehensive review on preparation methods and encapsulation mechanisms // *Journal of Future Foods*. 2023, V. 3. P. 99...114.
5. Bajac J., Nikolovski B., Lončarević I. etc. Microencapsulation of juniper berry essential oil by spray drying: Microcapsule characterization and release kinetics of the oil // *Food Hydrocolloids*. 2022. V. 125. P. 107430.
6. Guozhong Ts, Ying V. Nanostructures and nanomaterials. Synthesis, properties and application // *Nauchnyy mir*. 2022. P. 520.
7. Tariq Z., Izhar F., Malik M.H. etc. Development of functional textile via microencapsulation of peppermint oils: a novel approach in textile finishing // *Research Journal of Textile and Apparel*. 2022, P. 3...8.
8. Valle J.A.B., Valle R.d.C.S.C., Bierhalz A.C.K. etc. Chitosan microcapsules: methods of the production and use in the textile finishing // *Journal of applied polymer science*. 2021. V. 138. P. 29.
9. Huzum B., Puha B., Necoara R. etc. Biocompatibility assessment of biomaterials used in orthopedic devices // *Experimental and Therapeutic Medicine*. 2021. V. 22. N. 5. P. 1315.
10. Nguyen P., Vo T., Tran T. etc. Encapsulation efficiency and thermal stability of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oil microencapsulated by the spray-drying process // *Journal of Food Research*. 2021. V. 5. P. 195...202.
11. Grgic J., Selo G., Planinic M. etc. Role of the Encapsulation in Bioavailability of Phenolic Compounds // *Antioxidants (Basel)*. 2020. V. 9. P. 9239.
12. Semkina O.A. Technological aspects of obtaining microcapsules of substances of plant origin // *Voprosy biologicheskoy, meditsinskoy i farmatsevticheskoy khimii*. 2021. V. 24. P. 3...12.
13. Lysova M.A., Gruzintseva N.A., Gusev B.N. Establishment of standard values for quality indicators of nonwoven fabrics made from polyester fibers based on deformation values // *ChemChemTech*. 2022. V. 65. N 11. P. 98...103.
14. Burkitbai A., Sataeva V.M. Development of a polymer composition for the protection of textile material from bio-damage // *Bulletin of ATU*. 2020, V. 3. P. 43...46.
15. JyothiSri S. Microencapsulation: A review // *International Journal of Pharma and Bio Sciences*. 2012, V. 3. N. 1. P. 509...531.
16. Nelson G. Microencapsulation in textile finishing // *Review of Progress in Coloration and Related Topics*. 2022, V. 31. N. 1. P. 57...64.
17. Son K., Yoo D.I., Shin Y. Fixation of vitamin E microcapsules on dyed cotton fabrics // *Chemical Engineering Journal*. 2014, V. 239. P. 284...289.
18. Himmelsten K.J. Controlled Release: A Quantitative Treatment // *Springer Science & Business Media*. 2012, V. 1. P. 1...26.
19. Feuser P.E., Bubniak L.D.S., Bodack C.D.N. et al. // *J. Nanoscience. Nanotechnologiya*. 2016, V. 16. N. 7. P. 7669.

REFERENCES

20. *Kundu D., Hazra C., Chatterjee A. et al.* Extracellular biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using *Rhodococcus pyridinivorans* NT2: multifunctional textile finishing, biosafety evaluation and in vitro drug delivery in colon carcinoma // *J Photochem Photobiol B*. 2014. V. 140. P. 194...204.
21. *Asare E.O., Mun E.A., Marsili E., Paunov V.N.* Nanotechnologies for control of pathogenic microbial biofilms // *Journal of Materials Chemistry B*. 2022. V. 10. P. 5129...5153.
22. *Zhu L.-M., Yu D.G.* Biotextiles as Medical Implants // *Woodhead Publishing Series in Textiles*. 2013. P. 213...231.
23. *Amjad M.V.* Dendrimers in targeted delivery of antitumor drugs: achievements, problems and prospects for further research // *Farmatsiya i farmakologiya*. 2021. V. 9. No 1. P. 4...16.
24. *Maleki M., Amani-Tehran M., Latifi M., Mathur S.* Drug release profile in core-shell nanofibrous structures: a study on Peppas equation and artificial neural network modeling // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2014, V. 113. P. 92...100.
25. *Gerhardt L.-C., Lottenbach R., Rossi R.M., Deller S.* Tribological investigation of a functional medical textile with lubricating drug-delivery finishing // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2013. V. 108. P. 103...109.
26. *Zhou Y., Lou L., Fan J. et al.* Quantitative Comparison of Personal Cooling Garments in Performance and Design: A Review // *Processes*. 2023. V. 11. N. 10. P. 2976.
27. *Reis D.R., Ambrosi A., Di Luccio M.* Encapsulated essential oils: A perspective in food preservation // *Future Food*. 2022. V. 5. P. 100126.
28. *Esser-Kahn A.P., Odom S.A., Sottos N.R. et al.* Triggered Release from Polymer Capsules // *Macromolecules*. 2011. V. 44. N. 14. P. 5539.
29. *Liu K.H., Liu T.Y., Chen S.Y.* Drug release behavior of chitosan–montmorillonite nanocomposite hydrogels following electrostimulation // *Acta Biomaterial*. 2008. V. 4. N. 4. P. 1038...1045.
30. *Zheng C., Zhang X.G., Sun L.* Biodegradable and redox-responsive chitosan/poly(L-aspartic acid) submicron capsules for transmucosal delivery of proteins and peptides // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*. 2013. V. 24. N. 4. P. 931...939.
31. *Samrot A.V., Sean T.S., Kudaiyappan T.* Production, characterization and application of nanocarriers made of polysaccharides, proteins, bio-polyesters and other biopolymers: A review // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. V. 165. P. 3088...3105.
32. *Woraphatphadung T., Sajomsang W., Gonil P.* pH-Responsive polymeric micelles based on amphiphilic chitosan derivatives: Effect of hydrophobic cores on oral meloxicam delivery // *International journal of pharmaceuticals*. 2016, V. 497. N. 2. P. 150...160.
33. *Silva N.C., Silva S., Sarmiento B.* Chitosan nanoparticles for daptomycin delivery in ocular treatment of bacterial endophthalmitis // *J. Drug development and industrial pharmacy*. 2015. V. 1. P. 109.
34. *Ermakov A.V., Lengert E.V., Venig S.B.* Nanomedicine and Drug Delivery Strategies for Theranostics Applications // *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Fizika*. 2020. V. 20. P. 116...124.
35. *Ahmed S., Alhareth K., Mignet N.* Advancement in nanogel formulations provides controlled drug release // *International Journal of Pharmaceutics*. 2020. V. 584. P. 119435.
36. *Evdokimov I.A., Khairullin R.R., Perfilov S.A. et al.* Nanostructured composite material modified with graphene-like particles // *Izvestiya vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya*. 2020. V. 63. No 12. P. 37...43.
37. *Sankaranarayanan J., Mahmoud E.A., Kim G. et al.* Inflammation Responsive Logic Gate Nanoparticles for the Delivery of Proteins // *Bioconjugate chemistry*. 2010. V. 4. N. 10. P. 5930.
38. *Lu Z., Prouty M.D., Guo Z. et al.* // *Langmuir*. 2005. V. 21. N. 5. P. 2042.
39. *Ward M.A., Georgiou T.K.* Thermoresponsive Polymers for Biomedical Applications // *Polymers*. 2011. V. 3. N. 3. P. 1215...1242.
40. *Bordat A., Boissenot T., Nicolas J.* Thermoresponsive polymer nanocarriers for biomedical applications // *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2019. V. 138. P. 167...192.
41. *Xiong X., Campo A., Cui J.* Photoresponsive Polymers // *Smart Polymers and their Applications*. 2019. V. 1. P. 87...153.
42. *Smirnova K.V., Shutov D.A., Ivanov A.N. et al.* Plasma-solution synthesis of nickel-containing powders under the influence of a DC glow discharge // *Izvestiya vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya*. 2022. V. 65. No 7. P. 28...34.
43. *Liu J., Huang Y., Kumar A.* pH-Sensitive nanosystems for drug delivery in cancer therapy // *Biotechnology Advances*. 2014. V. 32. N. 4. P. 693...710.
44. *Arumugam S., Popik V.V., Arumugam S.* Light-Induced Hetero-Diels–Alder Cycloaddition: A Facile and Selective Photoclick Reaction // *Journal of the American Chemical Society*. 2011. V. 133. N. 14. P. 5573...5579.
45. *Rizwan M., Yahya R., Hassan A.* pH Sensitive Hydrogels in Drug Delivery: Brief History, Properties, Swelling, and Release Mechanism // *Material Selection and Applications. Polymers*. 2017, V. 9. N. 12. P. 137.
46. *Polkovnikova Yu.A., Severinova N.A., Kuryanova N.N. et al.* Morphological, technological and biopharmaceutical studies of alginate-chitosan microcapsules with vinpocetine // *Farmatsiya i farmakologiya*. 2019. V. 7. No 5. P. 279...290.
47. *Rizwan M., Yahya R., Hassan A.* pH Sensitive Hydrogels in Drug Delivery: Brief History, Properties, Swelling, and Release Mechanism Material Selection and Applications // *Polymers*. 2017. V. 9. N. 12. P. 137.
48. *Sabourian P., Tavakolian M., Yazdani H.* Stimuli-responsive chitosan as an advantageous platform for efficient delivery of bioactive agents // *Journal of Controlled Release*. 2020. V. 317. P. 216...231.
49. *Zhang X., Yang X., Ji J.* Tumor targeting strategies for chitosan-based nanoparticles. *Colloids Surfaces B // Biointerfaces*. 2016. V. 148. P. 460...473.

50. *Surov O.V., Voronova M.L., Rubleva N.V. et al.* Synthesis and properties of conjugates of nanocrystalline cellulose with active dyes // *News of universities. Chemistry and chemical technology.* 2021. V. 64. N. 2. P. 10...18.

51. *Bindu S., Mazumder S., Bandyopadhyay U.* Non-steroidal antiinflammatory drugs and organ damage: A current perspective // *Biochemical pharmacology.* 2020. V. 114147. P. 36...91.

52. *Olewnik-Kruszkowska E.* Biodegradation of polylactide-based composites with an addition of a compatibilizing agent in different environments // *International Biodeterioration & Biodegradation.* 2020. V. 147. P. 104840.

53. *Saifullah M., Islam Shishir M.R., Ferdowsi R. et al.* Micro and nano encapsulation, retention and controlled release of flavor and aroma compounds: A critical review // *Trends Food Sci. Technol.* 2019. V. 86. P. 230...251.

54. *Bychkova E.S.* Trends in the development of microcapsulation technology // *Food industry.* 2021. V. 4. P. 36...41.

55. *Weldrick P.J., Wang A., Halbus A.F., Paunov V.N.* Emerging nanotechnologies for targeting antimicrobial resistance // *Nanoscale.* 2022. V. 14. P. 4018...4041.

56. *Shilova S.V., Mirgaleeva G.M., Volkova M.V. et al.* Biocompatible delivery systems of the antibiotic

cefotaxime based on gel microparticles of calcium alginate // *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta.* 2021. P. 56...59.

57. *Weldrick J., Hardman M.J., Paunov V.N.* Smart active antibiotic nanocarriers with protease surface functionality can overcome biofilms of resistant bacteria // *Materials Chemistry Frontiers.* 2021. V. 5. P. 961...972.

58. *Hsu S., Xu J., Lin S.-H. et al.* Creative transformation of biomedical polyurethanes: from biostable tubing to biodegradable smart materials // *Journal of Polymer Research.* 2022/ V. 29. P. 70.

59. *Budanova G.N.* Innovative technologies in the production of new textile materials // *Aktual'nyye voprosy razvitiya innovatsionnoy deyatel'nosti v novom tysyacheletii.* 2014. N. 9. P. 10...12.

60. *Nelson G.* Microencapsulation in textile finishing // *Review of Progress in Coloration and Related Topics.* 2022. V. 31. N. 1. P. 57...64.

Рекомендована кафедрой химической технологии волокнистых материалов ИГХТУ. Поступила 06.05.24.