

СОЗДАНИЕ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОКАПСУЛИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

А.Ф. Алехина, К.А. Ерзунов, А.А. Малыгина, О.И. Одинцова

Анастасия Федоровна Алехина (ORCID 0009-0004-6709-0976), Константин Андреевич Ерзунов (ORCID 0000-0002-5632-1394), Анна Андреевна Малыгина (ORCID 0000-0002-1259-9351), Ольга Ивановна Одинцова (ORCID 0000-0001-5002-2601)*

Кафедра химической технологии волокнистых материалов, Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: anast.aleohina2016@yandex.ru, erzunovk@mail.ru, prohorova.a94@yandex.ru, odolga@yandex.ru*

В статье рассматриваются современные методы модификации текстильных материалов для придания им терморегулирующих свойств. В качестве инновационного и экономически обоснованного подхода рассмотрено микрокапсулирование с использованием веществ с фазовым переходом (ВФП). Эти вещества обладают уникальной способностью аккумулировать, хранить и высвобождать тепловую энергию в зависимости от изменений внешней среды, что делает их подходящим материалом для создания "умного" текстиля с адаптивными свойствами. Проведена оценка различных методов получения микрокапсул, включая физико-химические и химические способы. Среди них выделены наиболее эффективные и технологически приемлемые для крупномасштабного производства в текстильной промышленности. Особое внимание уделено выбору материалов для оболочек микрокапсул, их механической прочности, термической стабильности и устойчивости к физико-химическим воздействиям. Рассмотрены как традиционные материалы (полимеры, смолы), так и инновационные композиты, обеспечивающие повышенную долговечность и функциональность. В качестве ключевой технологии предложена локальная полимеризация «на месте», которая позволяет формировать прочные и однородные оболочки микрокапсул. Этот метод обеспечивает получение микрокапсул, характеризующихся высокой устойчивостью к физико-механическим нагрузкам, химическим воздействиям, что критически важно для текстильных изделий. Приведенные результаты исследований подтверждают, что микрокапсулирование ВФП с использованием локальной полимеризации значительно повышает долговечность и сохраняет функциональные свойства активного вещества даже при интенсивной эксплуатации текстильного материала с нанесенными микрокапсулами. Микрокапсулирование ВФП открывает новые возможности для разработки функциональных, комфортных и экологически устойчивых текстильных материалов, которые могут быть использованы в различных областях, включая одежду для экстремальных условий, например, костюмы для Арктики, медицинский текстиль, спортивную экипировку и интерьерные ткани. Показана необходимость дальнейших исследований для оптимизации технологических процессов и снижения себестоимости производства, что позволит сделать такие материалы более доступными для широкого круга потребителей.

Ключевые слова: вещества с фазовым переходом, микрокапсулирование, терморегулирующие свойства, терморегулирующий текстильный материал

Для цитирования:

Алехина А.Ф., Ерзунов К.А., Малыгина А.А., Одинцова О.И. Создание текстильных материалов с терморегулирующими свойствами на основе использования микрокапсулированных веществ с фазовым переходом. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 11. С. 6–24. DOI: 10.6060/ivkkt.20256811.7241.

For citation:

Alyokhina A.F., Erzunov K.A., Malygina A.A., Odintsova O.I. Creation of textile materials with thermoregulating properties based on the use of microcapsulated substances with a phase transition. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 11. P. 6–24. DOI: 10.6060/ivkkt.20256811.7241.

CREATION OF TEXTILE MATERIALS WITH THERMOREGULATING PROPERTIES BASED ON THE USE OF MICROCAPSULATED SUBSTANCES WITH A PHASE TRANSITION

A.F. Alyokhina, K.A. Erzunov, A.A. Malygina, O.I. Odintsova

Anastasia F. Alyokhina (ORCID 0009-0004-6709-0976), Konstantin A. Erzunov (ORCID 0000-0002-5632-1394), Anna A. Malygina (ORCID 0000-0002-1259-9351), Olga I. Odintsova (ORCID 0000-0001-5002-2601)*

Department of Chemical Technology of Fibrous Materials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: anast.aleohina2016@yandex.ru, erzunovk@mail.ru, prohorova.a94@yandex.ru, odolga@yandex.ru*

The article discusses modern methods of modifying textile materials to give them thermoregulatory properties. Microencapsulation using phase change substances (PCS) is considered as an innovative and economically feasible approach. These substances have a unique ability to accumulate, store and release thermal energy depending on changes in the external environment, which makes them a suitable material for creating "smart" textiles with adaptive properties. Various methods for producing microcapsules, including physicochemical and chemical methods, are assessed. Among them, the most effective and technologically acceptable for large-scale production in the textile industry are highlighted. Particular attention is paid to the choice of materials for microcapsule shells, their mechanical strength, thermal stability and resistance to physicochemical influences. Both traditional materials (polymers, resins) and innovative composites providing increased durability and functionality are considered. Local polymerization "in situ" is proposed as a key technology, which allows the formation of strong and uniform shells of microcapsules. This method ensures the production of microcapsules characterized by high resistance to physical and mechanical loads, chemical effects, which is critically important for textiles. The presented research results confirm that microencapsulation of PCS using local polymerization significantly increases the durability and preserves the functional properties of the active substance even with intensive use of the textile material with applied microcapsules. Microencapsulation of PCS opens up new opportunities for the development of functional, comfortable and environmentally sustainable textile materials that can be used in various fields, including clothing for extreme conditions, such as suits for the Arctic, medical textiles, sports equipment and interior fabrics. The need for further research is shown to optimize technological processes and reduce production costs, which will make such materials more accessible to a wide range of consumers.

Keywords: substances with phase transition, microcapsulation, thermoregulating properties, thermoregulating textile material

ВВЕДЕНИЕ

Современные терморегулирующие ткани разрабатываются на основе двух ключевых подходов: управления скоростью рассеивания тепла от текстильного материала и регулирования излучательной способности его внешней поверхности. Для реализации этих задач на текстильные материалы наносят специальные полимерные покрытия. Предложен способ получения пленки нанопористого полиэтилена. Наличие нанопор определяет возможность получения высокой пропускающей

способности в инфракрасном диапазоне, осуществляющей функцию отведения избыточного тепла. Установлено, что увеличение среднего размера пор с 200 нм до 4,8 мкм приводит к перемещению падения коэффициента пропускания из видимого диапазона в ближний и средний ИК-диапазоны. Таким образом, это позволяет целенаправленно регулировать диапазон длин волн, способных проходить через материал, обеспечивая эффективное управление теплом [1].

Кроме создания нанопористых структур, некоторые современные текстильные материалы

включают специальные электронные компоненты, такие как термодатчики и нагревательные элементы. Эти устройства позволяют активно регулировать температуру внутри одежды, обеспечивая комфорт пользователя независимо от внешних условий. Электронные системы могут реагировать на изменения температуры окружающей среды и тела человека, автоматически активируя нагрев или охлаждение. Например, встроенные нагреватели могут поддерживать стабильную температуру в холодных условиях, тогда как система охлаждения поможет избежать перегрева в жаркую погоду [2, 3].

Несмотря на то, что применение нанопористых материалов и интегрирование электронных систем представляют перспективные подходы для формирования терморегулирующих свойств текстильных материалов, такие технологии сталкиваются с рядом технических, экологических и экономических ограничений. Производство нанопористых материалов требует высокотехнологичных операций, например, литография, травление, что удорожает готовые материалы и выступает ограничением их массового внедрения. Размер, форма и химические свойства внутренних поверхностей пор влияют на взаимодействие материала с тепловым излучением, определяя его спектральную селективность. Для создания материалов с динамической терморегуляцией необходимы стратегии, позволяющие контролируемо изменять характеристики пор в ответ на внешние стимулы.

В случае применения электронных «умных» систем, способных к активному терморегулированию, значительно увеличивается масса текстильного изделия, ограничивая осуществление высокой физической активности. Такие системы также требуют источника питания или довольно частой замены элементов питания, для них характерна возможность выхода из строя со временем под воздействием влаги, частых перепадов температур, механических повреждений, при этом замена или ремонт таких электронных компонентов становится сложной и дорогостоящей задачей. В целом, создание электронных датчиков, сложных систем, обеспечивающих возможность управления тепловой энергией, формирует высокую экологическую нагрузку, так как многие материалы сложны в утилизации, переработке, характеризуются высоким содержанием токсичных веществ [4].

Одним из не менее перспективных направлений является получение легких материалов с мембранным покрытием: микропористые мембраны, обеспечивающие отвод водяного пара, гидрофиль-

ные мембраны, работа которых основана на диффузии молекул воды через пленку, а также комбинированные мембраны – комплекс микропористых и гидрофильных мембран. Комбинированные мембраны обеспечивают одновременно высокую водонепроницаемость и паропроницаемость, за счет чего способны поддерживать стабильную температуру микроклимата тела человека. На основании этой технологии получен материал, способный проявлять охлаждающий эффект в условиях высоких температур. Охлаждающий мембранный материал способен реагировать на изменения влажности за счет открытия и закрытия микроканалов для переноса воды. Это достигается использованием полимера с гидрофобной основой и гидрофильными боковыми цепями, например, Nafion. При воздействии водяного пара протоны (H^+) взаимодействуют с водой, формируя микроканалы, что вызывает набухание полимера и отведение тепла, создавая охлаждающий эффект [5, 6].

Несмотря на все преимущества мембранных материалов, основная их задача заключается в защите человека от неблагоприятных климатических условий, поддерживая высокую степень воздухообмена, удаление и отражение избыточной влаги, однако они не способны активно аккумулировать тепло, как в случае с материалами, содержащими вещества с фазовым переходом (ВФП). Таким образом, в условиях низкой влажности или отсутствия конденсации, мембранные материалы могут терять часть своих терморегулирующих свойств, в то время как ВФП способны сохранять оптимальную температуру тела человека вне зависимости от условий окружающей среды, что позволяет создавать текстильные материалы, подходящие для разных климатических зон и типов физической активности [7, 8].

Закрепление веществ, способных к фазовому переходу, на текстильных материалах, а также внедрение их на стадии электропрядения в структуру волокна, в настоящее время является наиболее перспективным способом создания материалов с высоким терморегулирующим эффектом. Данная технология обладает рядом преимуществ, которые главным образом определяются свойствами применяемых веществ с фазовым переходом, способных эффективно аккумулировать тепловую энергию и поддерживать стабильную температуру микроклимата организма человека в различных экстремальных условиях вне зависимости от внешних воздействующих факторов [9].

Использование ВФП для придания текстильным материалам терморегулирующих свойств

ВФП в зависимости от происхождения и структуры, характеристик осуществления процесса фазового перехода делятся на две основные группы: органические и неорганические соединения. К неорганическим можно отнести гидраты солей, множество солей и оксидов металлов, в то время как спектр органических веществ значительно шире и включает в себя парафины (*n*-алканы) с длинной линейной цепочкой, жирные кислоты, сложные эфиры. Применение веществ органического и неорганического происхождения для модификации текстильных материалов с целью создания терморегулирующего эффекта обусловлено их уникальными физико-химическими свойствами [10-12].

Обладая способностью к фазовому переходу, вещество при плавлении из твердого агрегатного состояния переходит в жидкое, накапливает избыточную тепловую энергию, а в условиях низких температур кристаллизуется, отдавая тепловую энергию. Для них характерны хорошая термическая и химическая стабильность. Кроме того, такие вещества характеризуются низкой теплопроводностью, но высокой скрытой теплоемкостью, т.е. способностью осуществлять поглощение/выделение теплоты в процессе фазового перехода, оставаясь при этом в термодинамическом равновесии. Это означает, что все макроскопические параметры системы (такие как давление, температура, объем и концентрация веществ) остаются постоянными во времени. Температура во всех частях системы выравнивается, что исключает наличие тепловых потоков. Таким образом, система стабильна и не подвержена внутренним изменениям без внешнего воздействия [13, 14]. Установлено, что большинство таких соединений могут выдерживать свыше тысячи циклов плавления/кристаллизации без изменений в структуре [15]. В настоящее время доступен широкий ассортимент органических веществ с фазовым переходом в диапазоне температур от -5 до +190 °С.

Выбор ВФП осуществляется, в первую очередь, в зависимости от назначения текстильного материала или изделия на основе такого материала и напрямую зависит от температуры плавления и кристаллизации, доступности, химической стабильности, удельной теплоемкости, способности эффективно аккумулировать тепло [16]. Соединения, способные осуществлять фазовый переход в температурном диапазоне от 18 до 65 °С, представ-

ляют наибольший интерес для модификации текстильных материалов с целью улучшения их терморегулирующих свойств. Так, например, вещества, подвергающиеся плавлению при 15 °С, отлично подходят для применения в создании текстильных материалов с выраженным охлаждающим эффектом [17, 18].

Неорганические ВФП, как правило, обладают более высокой теплопроводностью и термической стабильностью по сравнению с органическими. К числу ключевых представителей неорганических веществ с фазовым переходом относятся гидратированные соли, характеризующиеся наличием некоторого количества молекул воды в кристаллической структуре, отдельные оксиды металлов, эвтектические смеси нескольких неорганических веществ. Температурный интервал фазового перехода большинства гидратов солей лежит в пределах от 40 °С до значений, незначительно превышающих 100 °С. Гидратированные соли обладают высокой скрытой теплотой фазового перехода (100-300 Дж/г), теплопроводностью (~0,7 Вт/м·К), что в два раза выше, чем у парафинов и жирных кислот. Чистые металлы, обладая высокой теплопроводностью, перспективны в качестве веществ с фазовым переходом (ВФП) для терморегулирующих материалов (рис. 1, 2). Однако их высокая плотность ограничивает их применение в отраслях, требующих легкости и компактности, таких как строительство, авиация и космическая техника. Гидратированные соли, несмотря на меньшую теплопроводность, могут быть предпочтительнее благодаря более низкой плотности [17-24].

Применение гидратов в качестве ВФП ограничено протекающим процессом неконгруэнтного плавления, вызванным отщеплением молекул воды от соли во время плавления. Это приводит к последующему разделению фаз, при котором менее гидратированные соли отслаиваются из-за значительно высокой плотности. Данный процесс приводит к необратимому снижению эффективности проявления терморегулирующей способности текстильного материала [20]. Еще одной проблемой, возникающей в процессе применения гидратированных солей в качестве веществ с фазовым переходом, является "переохлаждение". Переохлаждение – состояние, при котором соединение остается в жидкой фазе при достижении температуры ниже точки плавления, что блокирует высвобождение накопленной скрытой теплоты. Для инициации начала кристаллизации требуется введение дополнительного охлаждающего компонента с высокой теплопроводностью [21].



Рис. 1. Зависимость скрытой теплоты плавления гидратированных солей от температуры плавления [22]

Fig. 1. The dependence of the latent heat of fusion of hydrated salts on the melting temperature [22]

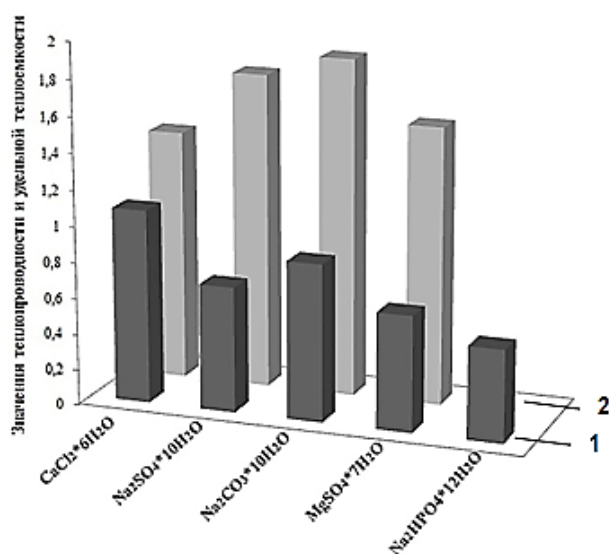


Рис. 2. Термофизические свойства гидратов солей, предложенных в качестве ВФП: 1- теплопроводность, Вт/мкл; 2- удельная теплоемкость твердой гидратированной соли, кДж/(кг·K) [23, 24]

Fig. 2. Thermophysical properties of salt hydrates proposed as PCS: 1- thermal conductivity, W/mkl; 2- specific heat capacity of a solid hydrated salt, kJ/(kg·K) [23, 24]

Эвтектические композиции неорганических соединений являются многокомпонентными составами, которые не стремятся к расслаиванию при повторяющихся циклах плавления и затвердевания, поскольку образуют однородные кристаллы. Данное явление исключает возможность разделения фаз в системе из-за разницы в плотности ее компонентов [25]. Таким образом, эвтектические смеси неорганических соединений демонстрируют способность к конгруэнтному плавлению, которое характеризуется постоянством качественного и количественного состава компонентов на всех стадиях фазового перехода. Кроме того, показано, что температура плавления эвтектических композиций может быть даже ниже, чем у отдельных ее компонентов [26, 27].

Разработан терморегулирующий текстильный материал с использованием эвтектической смеси, включающей следующие гидратированные соли: $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Эвтектическую смесь данных неорганических соединений сначала растворяли в дистиллированной воде, затем проводили процесс эмульгирования с использованием додецилсульфата натрия. Силиконовый каучук и тетраэтоксисилан, введенные на последующих стадиях приготовления композиции, выполняли роль матричной структуры эвтектической смеси. Полученный состав наносили в виде пленки на текстильный материал. Установлено, что такое покрытие практически не нарушает физические свойства текстильного материала, характеризуется простотой нанесения и обеспечивает равномерное распределение ВФП на поверхности. Терморегулирующие свойства модифицированного материала сохраняются после множества циклов плавления/кристаллизации эвтектической смеси, при этом использование силиконового каучука и тетраэтоксисилана позволяет эффективно закреплять на волокнах ВФП неорганического происхождения без необходимости введения дополнительных фиксирующих средств [28].

В отличие от неорганических ВФП, большинство представителей класса органических соединений являются биоразлагаемыми, химически стабильными, нетоксичными, доступными. По этой причине наиболее широко используются парафины (*n*-алканы) или парафиновые воски (*n*-октадекан, *n*-гексан, *n*-додекан), жирные кислоты (лауриновая кислота, каприловая, стеариновая кислоты и др.) и масла природного происхождения (кокосовое, ланолиновое, рапсовое), пчелиный воск, а также эвтектические смеси, содержащие перечисленные вещества и дополнительные компоненты с похожими теплофизическими характеристиками. Для таких веществ характерны температуры плавления, которые близки к температуре тела человека, что обеспечивает эффективность процесса аккумулирования тепловой энергии (рис. 3). Перечисленные соединения наиболее пригодны для создания широкого спектра материалов и изделий, непосредственно прилегающих к телу человека.

Несмотря на то, что неорганические вещества и их эвтектические смеси демонстрируют значительный потенциал для использования в технологиях придания терморегулирующих свойств текстильным материалам, применение для микрокапсулирования органических ВФП или их эвтектических смесей с неорганическими компонентами представляется более перспективным. Кроме того,

эвтектические смеси органических ВФП могут быть модифицированы путем введения дополнительных компонентов для достижения повышенного терморегулирующего эффекта, что делает их универсальными в создании текстильных материалов, в строительстве и других областях промышленности [30-41].

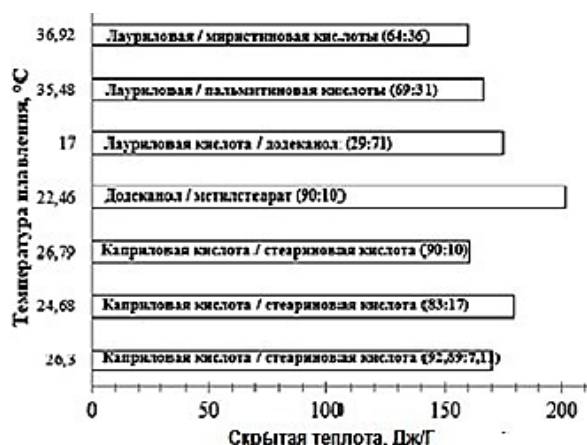


Рис. 3. Сравнительная характеристика термофизических свойств эвтектических смесей органических ВФП [29]
Fig. 3. Comparative characteristics of thermophysical properties of eutectic mixtures of organic PCS [29]

Установлено, что эвтектическая смесь, включающая такие компоненты, как тетрадекан и олеиновую кислоту, обладает температурой затвердевания около 1 °С, что значительно ниже, чем у исходных компонентов. При этом такая смесь демонстрирует повышенную стабильность при многократных циклах накопления и высвобождения тепловой энергии. Предложено применение бинарной композиции на основе тетрадекана и *n*-октадекана с температурой фазового перехода 2,87 °С и значением энтальпии плавления 179,60 Дж/г, что позволяет судить о возможности управлять терморегулирующими свойствами в соответствии с требуемыми эксплуатационными параметрами материала. Таким образом, эвтектические смеси органического происхождения характеризуются не только высокой энергоемкостью, но и возможностью гибкого управления теплофизическими характеристиками, что подчеркивает их потенциал для создания функциональных материалов с заданной терморегулирующей способностью.

N-Эйкозан – органическое ВФП, представитель класса алканы с температурой плавления 36,4 °С и удельной теплоемкостью 463,6 Дж/(моль·К). Данные термофизические характеристики показывают, что это соединение является перспективным для применения в отделке текстильных материалов для обеспечения повышенной терморегулирующей

способности. Вещество характеризуется высокой химической стабильностью после большого количества циклов плавления/кристаллизации [42-49].

Рапсовое масло является экологически чистым, биоразлагаемым материалом [50]. Рапсовое масло является производным сельскохозяйственной культуры рапса. Масло характеризуется высоким содержанием в составе моновенасыщенной эруковой кислоты (45-60%), а также основными компонентами являются триглицериды, включающие в себя глицерин, пальмитиновую, линолевую и другие жирные кислоты. Удельная теплоемкость рапсового масла находится в диапазоне 2000-2100 Дж/(кг·К) и демонстрирует линейную зависимость от температуры, увеличиваясь в интервале от 20 до 60 °С. Теплопроводность при 20 °С (0,169 Вт/(м·К)) может снижаться при дальнейшем нагревании масла, но данный недостаток легко компенсируется путем введения дополнительных компонентов, например, частиц графена, для формирования эвтектической смеси [51, 52]. Следует отметить, что рапсовое масло отлично комбинируется с другими маслами (пальмитиновое масло, кокосовое масло) или другими органическими соединениями для создания эвтектических смесей, способных проявлять заданные терморегулирующие свойства [53-55]. Ланолин, или ланолиновое масло, представляет собой воск животного происхождения, который получают путем обработки шерсти овец. Для ланолина характерна температура плавления в диапазоне 36-42 °С, что делает его подходящим для использования в создании материалов с повышенной терморегулирующей способностью, обеспечивающих возможность регулировать накопление/высвобождение тепловой энергии при температурах, близких к температуре тела человека. Кроме того, ланолин является гидрофобным соединением. Данное свойство предполагает формирование защитных структурных барьеров для предотвращения потерь влаги, способствуя повышению терморегулирующих свойств материала. Ланолин нетоксичен, биоразлагаем, безопасен для кожи человека, активно используется в фармацевтической, косметической промышленности и медицине [56-58].

Кокосовое масло представляет собой сложное органическое соединение, состоящее из системы с большим количеством насыщенных жирных кислот, таких как лауриновая (48%), миристиновая (16%), пальмитиновая (9,5%), каприновая (8%), каприловая (7%), олеиновая (6,5%) и др. [59]. Скрытая теплота плавления кокосового масла составляет 178 кДж/кг, что характеризует данное со-

единение как эффективный агент аккумуляции тепла. Среднее значение температуры плавления кокосового масла, полученного различными способами, практически не превышает 24 °С. Такие теплофизические характеристики позволяют кокосовому маслу в жидком агрегатном состоянии эффективно поглощать тепло как из окружающей среды, так и в результате метаболического тепла, выделяемого при высокой физической активности человека [60]. Поскольку кокосовое масло является биоразлагаемым веществом природного происхождения, оно выступает более экологичной альтернативой другим органическим материалам. Кроме того, низкая стоимость производства кокосового масла и высокая доступность сырья для его получения обеспечивают экономическую выгоду применения данного соединения. Эти характеристики, в сочетании с термофизическими свойствами, такими как высокая скрытая теплота плавления, устойчивость структуры к множеству циклов фазового перехода, позволяют использовать кокосовое масло в отделке текстильных материалов, предназначенных для пошива защитных жилетов, одежды специального назначения, с целью обеспечения быстрого реагирования на изменение температуры и проявления охлаждающего/согревающего эффекта [61].

Одним из ограничений в использовании для модификации текстильных материалов чистых ВФП является их способность к растеканию в процессе плавления, а вместе с этим возможность к деформации и значительному снижению степени их полезного использования. Данный недостаток формирует неравномерное распределение активного вещества на текстильном материале, кроме того, может способствовать ухудшению физико-механических характеристик материала. Кроме того, существенные потери активного вещества в процессе эксплуатации могут обуславливать необходимость дополнительной обработки материала, что экономически нецелесообразно и снижает рентабельность применения таких текстильных изделий [62, 63]. Для иммобилизации таких веществ на текстильные материалы используют различные связующие и полимерные композиции. При создании синтетических функциональных тканей ВФП может быть введен в волокнообразующий полимер в процессе электропрядения.

Изучен способ создания гибких волокон на основе полидиметилсилоксана, в полую структуру которых методом вакуумной инъекции внедряется смесь парафина, норадекана, термохромного агента с различными температурами фазового перехода,

что обеспечивает формирование повышенного терморегулирующего эффекта. Закрепление веществ с фазовым переходом (ВФП) внутри волокна посредством вакуумной инъекции обеспечивает равномерное распределение и полное заполнение внутренних полостей волокна, что является ключевым фактором для достижения однородности функциональных свойств текстильного материала [64].

Предложен метод получения терморегулирующего волокна, в котором поливиниловый спирт (ПВС) используется в качестве матричного полимера, а парафин – в качестве ВФП. Процесс формирования волокна осуществляется методом мокрого прядения. ПВС, выступая в роли структурной основы волокна, обеспечивает стабильность его структурной организации и механическую прочность, тогда как парафин формирует способность материала к терморегуляции [65].

Приведенные методы являются достаточно трудоемкими и не могут быть применены для всех типов текстильных материалов. К числу наиболее эффективных современных методов функционализации волокон относится метод микрокапсулирования. Микрокапсулирование веществ, изменяющих фазовое состояние, позволяет надежно изолировать активное вещество от окружающей среды и физико-механических воздействий, предотвращая его утечку в процессе плавления и преждевременную деструкцию, что позволяет увеличить срок службы изделия и сохранить его функциональные свойства в течение длительного времени.

Микрокапсулирование ВФП

Микрокапсулирование представляет собой эффективную технологию, которая нашла применение в фармацевтической, пищевой и сельскохозяйственной отраслях промышленности [66-68]. Одним из основных достоинств данной технологии является создание защитного барьера для инкапсулированного вещества от воздействия внешних физико-химических факторов, а также возможность управления процессом дозированного высвобождения активного компонента из капсулы. Защитная оболочка микрокапсул предохраняет их от преждевременного разрушения под влиянием внешних условий, включая температурные колебания, влажность и световое воздействие. Кроме того, такая оболочка позволяет реализовать целенаправленную доставку и контролируемое высвобождение инкапсулированного материала. Инкапсуляция способствует повышению стабильности активного вещества и снижению его реакционной способности, что приводит к увеличению срока проявления его функциональных свойств.

С помощью технологии микрокапсулирования возможно получение частиц микро- и наноразмеров с архитектурой «ядро-оболочка». Микрокапсулы чаще всего представляют собой сферу с однородной стенкой. Внутреннее содержимое, называемое ядром, внутренней фазой или наполнителем, окружено внешним слоем, который может быть обозначен как оболочка, покрытие или мембрана. На практике процесс микрокапсулирования представляет собой несколько сложных стадий получения частиц, при этом их форма редко ограничивается сферической. Вещество, подвергаемое капсулированию, может частично включать компоненты оболочки, содержать твердые частицы или микрокапсулы меньших размеров.

В зависимости от выбора материалов для формирования оболочки и заданных технологических параметров синтеза, микрокапсулы могут обладать различной архитектурой, включая структуры с одним ядром и многослойными оболочками, а также капсулы с множеством однородных и гетерогенных частиц активного вещества, инкапсулированных в единую оболочку. Возможен синтез капсул «неправильной» формы, состоящих из ядра и оболочки, подверженных морфологическим изменениям в зависимости от pH среды (рис. 4) [69, 70].

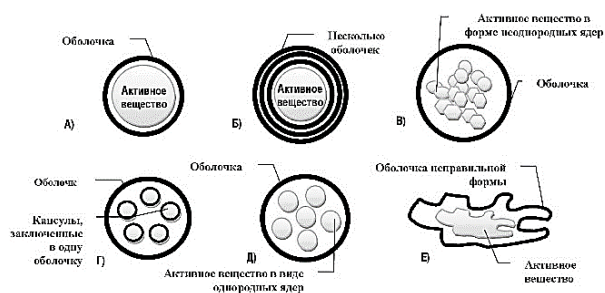


Рис. 4. Возможные формы микрокапсул: А) сферическая, монослойная; Б) сферическая с многослойной оболочкой; В) сферическая, содержащая капсулы меньших размеров; Г) сферическая, содержащая однородные частицы активного вещества; Д) активное вещество в виде однородных ядер в одной оболочке; Е) микрокапсула с оболочкой несферической формы

Fig. 4. Possible shapes of microcapsules: A) spherical, monolayer; B) spherical with a multilayer shell; В) spherical, containing homogeneous particles of the active substance; Г) spherical, containing homogeneous particles of the active substance; Д) active substance in the form of homogeneous nuclei in one shell; E) microcapsule with a shell of non-spherical shape

Одной из ключевых характеристик формируемой стенки капсулы является проницаемость, обусловленная пористостью структуры оболочки, которая определяет эффективность процесса массопереноса между активным веществом, заключенным в ядро, и внешней средой. Проницаемость влияет

на химическую стабильность активного вещества путем контроля проникновения, выступающего в качестве сильного окислителя, кислорода. Данное явление становится критически важным при инкапсуляции высоколетучих соединений, поскольку их термодинамическая нестабильность и высокая диффузионная способность требуют повышенных барьерных свойств оболочки для предотвращения потерь активного вещества [71].

Гидрофобная природа оболочек микрокапсул замедляет диффузию активного вещества в водную среду. Гидрофобные частицы компонентов, формирующих оболочку, обладают высокой степенью совместимости с неполярными средами, такими как масляные основы, что обеспечивает их равномерное распределение и устойчивость в таких системах. Это связано с минимизацией энергии межфазного взаимодействия между гидрофобной поверхностью частиц и неполярной средой, что предотвращает агрегацию частиц и стабилизирует микрокапсулы [72]. Такой подход особенно применим при капсулировании веществ с фазовым переходом. Основной принцип действия текстильных материалов с нанесенными капсулированными ВФП заключается в проявлении терморегулирующей способности за счет циклов плавления и кристаллизации препарата. В этой связи важной задачей является повышение степени иммобилизации микрокапсул и предотвращение самопроизвольного выхода активного вещества из ядра микрокапсулы. Поэтому для ВФП необходимо сформировать химически инертную непроницаемую оболочку.

В микрокапсулировании могут быть использованы пленочные материалы различного химического состава и структуры на основе природных, полусинтетических или синтетических полимеров, что обеспечивает возможность тонкой настройки физико-химических параметров формируемых оболочек микрокапсул [73].

Полимеры природного происхождения, такие как альгинаты, хитозан, желатин, пектин, гуаровая камедь и акации камеди, карбоксиметилцеллюлоза, поливиниловый спирт биоразлагаемы, нетоксичны, и полученные при их взаимодействии полимерные комплексы остаются инертными к активному веществу микрокапсулы. Известен способ получения стабильных форм микрокапсул, содержащих различные биологически активные вещества с использованием в качестве агентов, формирующих оболочку, альгината натрия и хитозана [74]. Образование оболочки капсулы протекает за счет ионного и электростатического взаимодействия отрицательно заряженных карбоксильных групп

альгината натрия с положительно заряженными протонированными аминогруппами хитозана. Оптимальное значение pH среды для протекания процесса “сшивки” альгината натрия и хитозана не должно превышать значения 5. В условиях pH среды 7 и выше происходит депротонирование амиогруппы, вследствие чего хитозан теряет свой положительный заряд, что является препятствующим фактором образования стабильной полимерной матрицы. Такие капсулы подвержены наиболее быстрому разрушению за счет появления микротрещин в структуре стенки, образованных в результате незавершенного процесса комплексообразования полимеров. Механические свойства микрочастиц во многом определяются длиной полимерной цепочки компонентов, формирующих оболочку: высокомолекулярные полимеры обеспечивают более устойчивую и прочную структуру за счет увеличения плотности полимерной сетки и усиления межмолекулярных взаимодействий, обусловленных образованием водородных связей и возникновением сил Ван-дер-Ваальса [75]. Существуют технологии, в которых оболочка микрокапсулы формируется на основе одного полимера [76]. В качестве образующих оболочку компонентов часто используются полимеры синтетического происхождения, а также бинарные композиции полимеров природного и синтетического происхождения, таких, как полиамиды, полимочевины, полиуретаны и аминопластовые смолы на основе мочевины и меламина.

Меламиноформальдегидные смолы, в частности, благодаря своей экономической доступности, высокой эффективности инкапсуляции и механической устойчивости, широко применяются в различных отраслях промышленности, включая производство бытовых товаров, отделку кожевенных материалов, создание и обработку строительных материалов. Процесс полимеризации протекает в кислых условиях, что приводит к образованию высокосшитых полимерных сеток [77]. Современные подходы к получению меламиновых микрокапсул, основанные на полимеризации глиоксаля и его производных с меламином, мочевиной или гуанозолом, делают упор на безформальдегидные методы синтеза. Оболочки микрокапсул, полученных с использованием перечисленных соединений, обладают высокой прочностью, а сами микрокапсулы имеют правильную сферическую форму с четко выраженной архитектурой ядра и оболочки [78].

Методы микрокапсулирования веществ с фазовым переходом

Существует несколько методов микрокапсулирования, которые делятся на три основные группы. Классификация этих методов основана на химических и физических свойствах веществ, применяемых в качестве материала ядра микрокапсулы и способах взаимодействия агентов, формирующих оболочку.

В зависимости от природы соединений, способных образовывать оболочку микрокапсул – мономеров, полимеров или предполимеров – методы микрокапсулирования принято подразделять на два фундаментальных класса. Первый класс основан на химических реакциях между агентами, формирующими оболочку, которые протекают одновременно с процессом формирования микрокапсул. Второй класс исключает химические реакции, способствующие образованию микрокапсул, и предполагает формирование оболочки вокруг активного вещества без химического взаимодействия. Одним из таких процессов является электростатическое взаимодействие, при котором формирование оболочки вокруг активного вещества происходит за счет сил электростатического притяжения между противоположно заряженными компонентами [74-78].

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОКАПСУЛ

Фазовая коацервация

Фазовая коацервация – это один из самых первых и распространенных методов микрокапсулирования. Различают две категории фазовой коацервации: простая коацервация, где для капсулирования используется один коллоидный раствор (например, желатин или хитозан), и комплексная коацервация, где оболочка капсулы образуется при взаимодействии двух противоположно заряженных полимеров (например, желатин с гуммиарабиком или хитозаном) [79].

Процесс коацервации включает четыре основных этапа:

- диспергирование микрокапсулируемого вещества в растворе поверхностно-активного вещества;
- осаждение компонентов, образующих оболочку, на капли активного вещества за счет снижения их растворимости посредством введения в систему дополнительных веществ, путем изменения pH, температуры или добавления электролита;

- введение второго коллоидного раствора для формирования полимерного комплекса в случае процесса комплексной коацервации;

- стабилизация и отверждение микрокапсул с помощью сшивающего агента, такого как формальдегид или глутаровый альдегид

Сшивающий агент может вводиться в систему как после эмульгирования активного вещества, так и в процессе стабилизации формирующейся оболочки [80].

Выпаривание растворителя

Выпаривание растворителя, также известное как метод экстракции растворителем, является распространенной технологией для получения микрокапсул, особенно в фармацевтической области. Однако его применение в текстильной промышленности остается ограниченным, за исключением случаев инкапсуляции ароматизаторов в оболочки на основе полимолочной кислоты или термохромных соединений этилцеллюлозы.

Процесс включает четыре основных этапа: (1) растворение или диспергирование активного вещества в органическом растворителе с компонентами, способными к образованию оболочки; (2) эмульгирование органической фазы во второй непрерывной несмешивающейся фазе; (3) экстракция растворителя из дисперсной фазы с помощью нагрева, что способствует образованию полимерного покрытия вокруг активного вещества; (4) выделение, очистка и сушка полученных микрокапсул [81].

Свойства микрокапсул зависят от концентрации используемых веществ, их растворимости в воде и других типах растворителей, природы и диспергирующего агента (поверхностно-активного вещества), от соотношений полимера, формирующего оболочку, и активного вещества, температурно-временных параметров синтеза, а также скорости перемешивания полученной системы [82, 83].

В текстильной промышленности активно исследуются различные альтернативные методы микрокапсулирования. Особое внимание уделяется применению в качестве оболочек капсул циклодекстринов и их производных. Микрокапсулы с оболочками на их основе используются в отделке текстильных материалов для контролируемого высвобождения ароматизаторов, инсектицидов, лекарственных средств и антибактериальных составов, а также для нейтрализации неприятных запахов пота [84, 85].

ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СИНТЕЗА КАПСУЛ

Межфазная полимеризация

Межфазная полимеризация, основанная на механизмах поликонденсации и полиприсоединения, представляет собой процесс формирования полимерной оболочки вокруг капли или частиц активного вещества за счет взаимодействия мономеров соединений, формирующих оболочку. Технология обеспечивает возможность инкапсуляции разнообразных материалов, включая водорастворимые вещества, гидрофобные жидкости, твердые частицы.

Основным этапом процесса является диспергирование фазы, содержащей активное вещество, до образования капель требуемого размера в непрерывной фазе. В некоторых случаях диффузия реагентов к границе раздела фаз может ограничивать скорость инкапсуляции, снижая реакционную способность системы и приводя к замедлению процесса полимеризации [86].

При капсулировании методом межфазной полимеризации могут использоваться полимеры синтетического и природного происхождения. В некоторых случаях метод межфазной полимеризации совмещают с такими методами, как коацервация, испарение растворителя и ионное гелеобразование. Эмульгирование в процессе микрокапсулирования приводит к широкому распределению размеров капсул, которое зависит от типа рабочей мешалки, скорости перемешивания, температуры, pH среды и других физико-химических параметров. Выбор поверхностно-активных веществ (ПАВ) имеет критическое значение для предотвращения агрегации частиц [87]. Микрокапсулирование активного вещества основано на создании системы, в которой вещество диспергируется в фазе-носителе – липофильной или гидрофильной, при этом выбор фазы-носителя напрямую зависит от растворимости капсулируемого вещества [88]. В каждой фазе присутствует мономер, который взаимодействует с мономером противоположной фазы. В результате реакции на границе раздела фаз образуются нерастворимые олигомеры, которые формируют оболочку капсулы [89, 90].

Суспензионная полимеризация

Суспензионная полимеризация представляет собой метод получения микрокапсул со средним диаметром от 2 до 10 мкм, что коррелирует с размером исходных капель капсулируемого мономера. Данный процесс осуществляется в гетерогенной системе, где дисперсная фаза, состоящая из капель мономера, стабилизирована в водной среде. Нерастворимый в воде мономер содержит инициа-

тор полимеризации, который может быть введен как в сам мономер, так и в непрерывную фазу. Стабилизация капель обеспечивается за счет интенсивного механического перемешивания и применения гидрофильных стабилизаторов, таких как поливиниловый спирт или производные целлюлозы. Водная фаза может дополнительно содержать буферные системы для контроля pH среды [91, 92].

На размер и морфологию образующихся частиц влияет комплекс взаимно протекающих процессов, таких как коалесценция или дробление капель мономеров, а также их диффузия в дисперсной среде. По завершении полимеризации полученные частицы подвергаются промывке для удаления примесей и остаточных реагентов. Основными преимуществами данного метода, особенно для полимеризации стирола и метилметакрилата, являются эффективное отведение тепла экзотермической реакции полимеризации через непрерывную фазу и формирование монодисперсных сферических частиц. Однако ключевым ограничением метода является склонность частиц к коалесценции в процессе синтеза. Размер частиц находится в прямой зависимости от интенсивности перемешивания, что позволяет контролировать их дисперсность [93].

Локальная полимеризация "на месте"

Метод полимеризации "на месте" основан на наличии в реакционной системе двух фаз – сплошной и дисперсной, в одной из которых растворяется мономер или форполимер. Процесс полимеризации инициируется введением различных активирующих агентов (минеральные кислоты, перекись водорода и др.) или под воздействием внешних факторов, включающих изменение температуры, давления, УФ-излучение, что приводит к образованию свободных радикалов и началу роста полимерных цепочек. По мере протекания реакции полимерные цепочки постепенно формируют оболочку вокруг дисперсной фазы, стабилизируясь на границе раздела фаз, и в результате образуются микрокапсулы с целевым материалом в ядре. Процесс продолжается до достижения заданной толщины оболочки. Метод применяется для создания микрокапсул различного назначения, включая инкапсулированные ароматизаторы, средства от насекомых, антипирены, красители и вещества с фазовым переходом.

В зависимости от растворимости мономера, форполимера и формируемого полимера выделяют три типа полимеризации:

(1) поликонденсация в суспензии, когда мономер нерастворим в полимеризационной среде;

(2) поликонденсация в виде осаждения, где непрерывная фаза выполняет двойную функцию: выступает в качестве растворителя для мономера и одновременно как осадитель для образующегося полимера;

(3) поликонденсация в системе, где среда реакции выполняет двойную функцию: растворяет мономер, обеспечивая его доступность, но не растворяет полимер, что приводит к его осаждению или образованию дисперсии.

Применение меламинаформальдегидной смолы в процессе полимеризации "на месте" представляет собой экономически и технологически эффективный подход к формированию высоко стабилизированных микрокапсул с повышенной термостойкостью и механической прочностью. Синтез особенно устойчивых к внешним воздействиям микрокапсул обусловлен особенностью структуры меламинаформальдегидного полимера к образованию плотно сшитой сетки в оболочке капсулы. Форполимеры меламинаформальдегида характеризуются высокой реакционной способностью за счет наличия активных функциональных групп, способных к дальнейшей поликонденсации. Эта особенность позволяет контролировать время протекания реакции, а также регулировать количество необходимого для формирования оболочки полимера [94, 95].

На первом этапе частицы капсулируемого вещества диспергируются в водной фазе, содержащей мономеры (например, меламин и формальдегид) или форполимеры и поверхностно-активные вещества. На втором этапе мономеры или форполимеры активируются кислотным катализатором, что приводит к образованию низкомолекулярных аминополимеров. Эти соединения остаются растворимыми в водной фазе, но начинают терять растворимость по мере повышения кислотности среды. На третьем этапе происходит отделение фазы, богатой форполимером, которая осаждается на поверхности частиц ядра микрокапсулы. Это обусловлено электростатическим взаимодействием и образованием водородных связей полимера с молекулами ПАВ, что приводит к увеличению концентрации смолы в пограничном слое. Затем в пограничном слое инициируется поликонденсация, в результате которой формируется поперечно сшитая полимерная оболочка за счет образования эфирных или метиленовых связей. На завершающей стадии для снижения содержания свободного формальдегида, который может выделяться в ходе протекания процессов полимеризации, часто применяются специальные вещества-поглотители (например,

аммиак, мочеви́на). С целью повышения стабильности и сохранения функциональных свойств микрокапсул возможно варьирование такие параметров процесса, как температура и pH среды, а также скорость перемешивания готовой композиции [96].

Таким образом, химические методы микрокапсулирования ВФП, такие как локальная полимеризация "на месте", демонстрируют более высокую эффективность по сравнению с физико-химическими методами. Это обусловлено их способностью формировать прочные и устойчивые оболочки микрокапсул, которые выдерживают многократные циклы нагрева и охлаждения. Химические методы обеспечивают точное управление процессом формирования оболочки, что позволяет достичь ее оптимальной толщины и плотности, необходимых для защиты активных веществ с фазовым переходом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных данных подчеркивает значимость технологии микрокапсулирования веществ с фазовым переходом, внедрение которой в производство текстильных материалов является высокоэффективным подходом к созданию изделий с повышенными терморегулирующими свойствами. Существующие методы получения таких материалов сталкиваются с ограничениями, связанными с экономической целесообразностью и адаптацией к различным климатическим условиям. В этой связи особый интерес представляет использование микрокапсулирования, которое позволяет интегрировать в текстиль функциональные компоненты, способные быстро реагировать на температурные изменения окружающей среды.

Проанализированы различные технологии производства микрокапсул, что позволило выделить наиболее перспективные для промышленного внедрения. Особое внимание уделено способам синтеза оболочек микрокапсул, которые должны сочетать в себе высокую механическую прочность,

термическую стабильность и устойчивость к внешним воздействиям. Применение современных композитных материалов и инновационных методов, таких как локальная полимеризация, обеспечивает создание долговечных и функциональных микрокапсул, способных выдерживать интенсивные эксплуатационные нагрузки.

Использование микрокапсулированных веществ с фазовым переходом открывает новые горизонты для разработки "умного" текстиля. Такие материалы могут найти применение в широком спектре областей, включая производство специализированной одежды для экстремальных условий, медицинских изделий, спортивной экипировки и декоративных тканей. Их способность адаптироваться к температурным изменениям делает их особенно востребованными в условиях, где комфорт и функциональность играют ключевую роль.

Для развития данного направления необходимо сосредоточить усилия на оптимизации производственных процессов, снижении затрат и повышении доступности технологии. Это позволит расширить сферу применения терморегулирующих текстильных материалов и сделать их более конкурентоспособными на рынке. Дальнейшие исследования в этой области могут способствовать созданию новых поколений текстиля, отличающегося высокой функциональностью.

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

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

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project number FZZW2023-0008).

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Hsu P.C., Song A.Y., Catrysse P.B., Liu C., Peng Y., Xie J., Fan S., Cui Y. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile. *Science*. 2016. V. 353. N 6303. P. 1019-1023. DOI: 10.1126/science.aaf5471.
2. Liu X., Miao J., Fan Q., Zhang W., Zuo X., Tian M., Zhu S., Zhang X., Qu L. Smart textile based on 3D stretchable silver nanowires. *ACS Appl. Mater. Interf.* 2021. V. 13. N 47. P. 56607-56619. DOI: 10.1021/acsami.1c18828.
3. Faruk M.O., Ahmed A., Jalil M.A., Islam M.T., Shamim A.M., Adak B., Hossain M.M., Mukhopadhyay S. Functional textiles and composite based wearable thermal devices for Joule heating: progress and perspectives. *Appl. Mater. Today*. 2021. V. 23. P. 101025. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101025.

REFERENCES

1. Hsu P.C., Song A.Y., Catrysse P.B., Liu C., Peng Y., Xie J., Fan S., Cui Y. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile. *Science*. 2016. V. 353. N 6303. P. 1019-1023. DOI: 10.1126/science.aaf5471.
2. Liu X., Miao J., Fan Q., Zhang W., Zuo X., Tian M., Zhu S., Zhang X., Qu L. Smart textile based on 3D stretchable silver nanowires. *ACS Appl. Mater. Interf.* 2021. V. 13. N 47. P. 56607-56619. DOI: 10.1021/acsami.1c18828.
3. Faruk M.O., Ahmed A., Jalil M.A., Islam M.T., Shamim A.M., Adak B., Hossain M.M., Mukhopadhyay S. Functional textiles and composite based wearable thermal devices for Joule heating: progress and perspectives. *Appl. Mater. Today*. 2021. V. 23. P. 101025. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.101025.

4. **Repon M.R., Micucioniene D.** Progress in flexible electronic textile for heating application: A critical review. *Materials*. 2021. V. 14. N 21. P. 6540. DOI: 10.3390/ma14216540.
5. **Feng W., Zhang Y., Shao Y., Huang T., Zhang N., Yang J., Qi X., Wang Y.** Coaxial electrospun membranes with thermal energy storage and shape memory functions for simultaneous thermal/moisture management in personal cooling textiles. *Eur. Polym. J.* 2021. V. 145. P. 110245. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2020.110245.
6. **Li X., Guo W., Hsu P.C.** Personal Thermoregulation by Moisture-Engineered Materials. *Adv. Mater.* 2024. V. 36. N 12. P. 2209825. DOI: 10.1002/adma.202209825.
7. **Fang Y., Chen G., Bick M., Chen J.** Smart textiles for personalized thermoregulation. *Chem. Soc. Rev.* 2021. V. 50. N 17. P. 9357-9374. DOI: 10.1039/D1CS00003A.
8. **Wu J., Wang M., Dong L., Shi J., Ohyama M., Kohsaka Y., Zhu C., Morikawa H.** A trimode thermoregulatory flexible fibrous membrane designed with hierarchical core-sheath fiber structure for wearable personal thermal management. *ACS Nano*. 2022. V. 16. N 8. P. 12801-12812. DOI: 10.1021/acsnano.2c04971.
9. **Stonehouse A., Abeykoon C.** Thermal properties of phase change materials reinforced with multi-dimensional carbon nanomaterials. *Internat. J. Heat Mass Tran.* 2022. V. 183. P. 122166. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122166.
10. **Xiang B., Zhang X.** Advancements in the development of field precooling of fruits and vegetables with/without phase change materials. *J. Energy Storage*. 2023. V. 73. P. 109007. DOI: 10.1016/j.est.2023.109007.
11. **Sarier N., Onder E.** Organic phase change materials and their textile applications: an overview. *Thermochim. Acta*. 2012. V. 540. P. 7-60. DOI: 10.1016/j.tca.2012.04.013.
12. **Zhou Y., Lou L., Fan J.** Quantitative Comparison of Personal Cooling Garments in Performance and Design: A Review. *Processes*. 2023. V. 11. N 10. P. 2976. DOI: 10.3390/pr11102976.
13. **Hossain M.T., Shahid M.A., Limon M.G.M., Hossain I., Mahmud N.** Techniques, applications, and challenges in textiles for sustainable future. *J. Open Innov.: Technol., Market, Complexity*. 2024. P. 100230. DOI: 10.1016/j.joitmc.2024.100230.
14. **Mengjie S., Pun W.M., Swapnil D., Dongmei P., Ning M.** Thermal stability of organic binary PCMs for energy storage. *Energy Procedia*. 2017. V. 142. P. 3287-3294. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.459.
15. **Zhang J.J., Zhang J.L., He S.M., Wu K.Z., Liu X.D.** Thermal studies on the solid-liquid phase transition in binary systems of fatty acids. *Thermochim. Acta*. 2001. V. 369. N 1-2. P. 157-160. DOI: 10.1016/S0040-6031(00)00766-8.
16. **Kouksou T., Jamil A., Rhafiki T. EL., Zeraouli Y.** Paraffin wax mixtures as phase change materials. *Solar Energy Mater. Solar Cells*. 2010. V. 94. N 12. P. 2158-2165. DOI: 10.1016/j.solmat.2010.07.005.
17. **Guo R., Shan L., Wu Y., Cai Y., Huang R., Ma H., Tang K., Liu K.** Phase-change materials for intelligent temperature regulation. *Mater. Today Energy*. 2022. V. 23. P. 100888. DOI: 10.1016/j.mtener.2021.100888.
18. **Hameed G., Ghafoor M.A., Yousaf M., Imran M., Zaman M., Elkamel A., Rizwan M.** Low temperature phase change materials for thermal energy storage: Current status and computational perspectives. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2022. V. 50. P. 101808. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101808.
19. **Choo Y.M., Wei W.** Salthydrates as phase change materials for photovoltaics thermal management. *Energy Sci. Eng.* 2022. V. 10. N 5. P. 1630-1642. DOI: 10.1002/ese3.1007.
4. **Repon M.R., Micucioniene D.** Progress in flexible electronic textile for heating application: A critical review. *Materials*. 2021. V. 14. N 21. P. 6540. DOI: 10.3390/ma14216540.
5. **Feng W., Zhang Y., Shao Y., Huang T., Zhang N., Yang J., Qi X., Wang Y.** Coaxial electrospun membranes with thermal energy storage and shape memory functions for simultaneous thermal/moisture management in personal cooling textiles. *Eur. Polym. J.* 2021. V. 145. P. 110245. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2020.110245.
6. **Li X., Guo W., Hsu P.C.** Personal Thermoregulation by Moisture-Engineered Materials. *Adv. Mater.* 2024. V. 36. N 12. P. 2209825. DOI: 10.1002/adma.202209825.
7. **Fang Y., Chen G., Bick M., Chen J.** Smart textiles for personalized thermoregulation. *Chem. Soc. Rev.* 2021. V. 50. N 17. P. 9357-9374. DOI: 10.1039/D1CS00003A.
8. **Wu J., Wang M., Dong L., Shi J., Ohyama M., Kohsaka Y., Zhu C., Morikawa H.** A trimode thermoregulatory flexible fibrous membrane designed with hierarchical core-sheath fiber structure for wearable personal thermal management. *ACS Nano*. 2022. V. 16. N 8. P. 12801-12812. DOI: 10.1021/acsnano.2c04971.
9. **Stonehouse A., Abeykoon C.** Thermal properties of phase change materials reinforced with multi-dimensional carbon nanomaterials. *Internat. J. Heat Mass Tran.* 2022. V. 183. P. 122166. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122166.
10. **Xiang B., Zhang X.** Advancements in the development of field precooling of fruits and vegetables with/without phase change materials. *J. Energy Storage*. 2023. V. 73. P. 109007. DOI: 10.1016/j.est.2023.109007.
11. **Sarier N., Onder E.** Organic phase change materials and their textile applications: an overview. *Thermochim. Acta*. 2012. V. 540. P. 7-60. DOI: 10.1016/j.tca.2012.04.013.
12. **Zhou Y., Lou L., Fan J.** Quantitative Comparison of Personal Cooling Garments in Performance and Design: A Review. *Processes*. 2023. V. 11. N 10. P. 2976. DOI: 10.3390/pr11102976.
13. **Hossain M.T., Shahid M.A., Limon M.G.M., Hossain I., Mahmud N.** Techniques, applications, and challenges in textiles for sustainable future. *J. Open Innov.: Technol., Market, Complexity*. 2024. P. 100230. DOI: 10.1016/j.joitmc.2024.100230.
14. **Mengjie S., Pun W.M., Swapnil D., Dongmei P., Ning M.** Thermal stability of organic binary PCMs for energy storage. *Energy Procedia*. 2017. V. 142. P. 3287-3294. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.459.
15. **Zhang J.J., Zhang J.L., He S.M., Wu K.Z., Liu X.D.** Thermal studies on the solid-liquid phase transition in binary systems of fatty acids. *Thermochim. Acta*. 2001. V. 369. N 1-2. P. 157-160. DOI: 10.1016/S0040-6031(00)00766-8.
16. **Kouksou T., Jamil A., Rhafiki T. EL., Zeraouli Y.** Paraffin wax mixtures as phase change materials. *Solar Energy Mater. Solar Cells*. 2010. V. 94. N 12. P. 2158-2165. DOI: 10.1016/j.solmat.2010.07.005.
17. **Guo R., Shan L., Wu Y., Cai Y., Huang R., Ma H., Tang K., Liu K.** Phase-change materials for intelligent temperature regulation. *Mater. Today Energy*. 2022. V. 23. P. 100888. DOI: 10.1016/j.mtener.2021.100888.
18. **Hameed G., Ghafoor M.A., Yousaf M., Imran M., Zaman M., Elkamel A., Rizwan M.** Low temperature phase change materials for thermal energy storage: Current status and computational perspectives. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2022. V. 50. P. 101808. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101808.
19. **Choo Y.M., Wei W.** Salthydrates as phase change materials for photovoltaics thermal management. *Energy Sci. Eng.* 2022. V. 10. N 5. P. 1630-1642. DOI: 10.1002/ese3.1007.

20. Farid M.M., Khudhair A.M., Razack S.A.K., Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conver. Manag.* 2004. V. 45. N 9-10. P. 1597-1615. DOI: 10.1201/9780367567699.
21. Pielichowska K., Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage. *Prog. Mater. Sci.* 2014. V. 65. P. 67-123. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2014.03.005.
22. Junaid M.F., Rehman ur Z., Ijaz N., Cekon M., Curpek J., Elhag A.B. Biobased phase change materials from a perspective of recycling, resources conservation and green buildings. *Energy Build.* 2022. V. 270. P. 112280. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112280.
23. Malode S.J., Shetti N.P. Thermal energy storage systems using bio-based phase change materials: A comprehensive review for building energy efficiency. *J. Energy Storage.* 2025. V. 105. P. 114709. DOI: 10.1016/j.est.2024.114709.
24. Tan S., Zhang X. Progress of research on phase change energy storage materials in their thermal conductivity. *J. Energy Storage.* 2023. V. 61. P. 106772. DOI: 10.1016/j.est.2023.106772.
25. Mehling H., Cabeza L.F. Heat and cold storage with PCM. *Heat Mass Transf.* 2008. P. 11-55. DOI: 10.1007/978-3-540-68557-9.
26. Mohamed S.A., Al-Suliman F.A., Ibrahim N.I., Zahir M.H., Al-Ahmed A., Saidur R., Yilbas B.S. A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017. V. 70. P. 1072-1089. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.012.
27. Sun M., Liu T., Sha H., Li M., Liu T., Wang M., Chen G., Wang J., Jiang D. A review on thermal energy storage with eutectic phase change materials: Fundamentals and applications. *J. Energy Storage.* 2023. V. 68. P. 107713. DOI: 10.1016/j.est.2023.107713.
28. Kazemi Z., Mortazavi S.M., Shahmoradi Ghaten F. Developing a novel thermo-regulating cotton fabric using inorganic eutectic phase change material. *Cellulose.* 2023. V. 30. N 2. P. 1287-1303. DOI: 10.1007/s10570-022-04919-6.
29. Wang W., Zhang Q., Liu L., Sun Y., Wu J., Tao J., Lu X. Fabrication of air-conditioning tussah silk with capric–stearic eutectic mixture for effective energy storage and thermal regulatory applications. *Polym. Int.* 2023. V. 72. N 2. P. 217-229. DOI: 10.1002/pi.6461.
30. Khan M.S.H., Rahaman M.T., Pranta A.D., Hasan M.K. Eco-friendly organic nanomaterials for multifunctional textiles: sources, applications, recent advances and future prospects towards sustainability. *Internat. J. Environ. Sci. Technol.* 2025. V. 22. P. 7353-7410. DOI: 10.1007/s13762-024-06299-9.
31. Nikoonahad M., Sadrameli S.M., Arabpour Roghabadi F. Preparation and optimization of nanoencapsulated capric acid being as a renewable phase change material with TiO₂ shell as shape-stabilized thermal energy storage material. *J. of Therm. Analysis and Calorimetry.* 2023. V. 148. N 20. P. 10735-10747. DOI: 10.1007/s10973-023-12436-2.
32. Ao C., Yan S., Zhao S., Hu W., Zhao L., Wu Y. Stearic acid/expanded graphite composite phase change material with high thermal conductivity for thermal energy storage. *Energy Reports.* 2022. V. 8. P. 4834-4843. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.03.172.
33. Ghufuran M., Huitink D. Synthesis of silica-encapsulated myristic acid phase-change-assisted nanocapsules for thermal management applications. *Emergent Mater.* 2024. P. 1-15. DOI: 10.1007/s42247-024-00719-9.
34. Bhutto Y.A., Pandey A.K., Islam A., Rajamony R.K. Lauric acid based form-stable phase change material for effective
20. Farid M.M., Khudhair A.M., Razack S.A.K., Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conver. Manag.* 2004. V. 45. N 9-10. P. 1597-1615. DOI: 10.1201/9780367567699.
21. Pielichowska K., Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage. *Prog. Mater. Sci.* 2014. V. 65. P. 67-123. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2014.03.005.
22. Junaid M.F., Rehman ur Z., Ijaz N., Cekon M., Curpek J., Elhag A.B. Biobased phase change materials from a perspective of recycling, resources conservation and green buildings. *Energy Build.* 2022. V. 270. P. 112280. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112280.
23. Malode S.J., Shetti N.P. Thermal energy storage systems using bio-based phase change materials: A comprehensive review for building energy efficiency. *J. Energy Storage.* 2025. V. 105. P. 114709. DOI: 10.1016/j.est.2024.114709.
24. Tan S., Zhang X. Progress of research on phase change energy storage materials in their thermal conductivity. *J. Energy Storage.* 2023. V. 61. P. 106772. DOI: 10.1016/j.est.2023.106772.
25. Mehling H., Cabeza L.F. Heat and cold storage with PCM. *Heat Mass. Transf.* 2008. P. 11-55. DOI: 10.1007/978-3-540-68557-9.
26. Mohamed S.A., Al-Suliman F.A., Ibrahim N.I., Zahir M.H., Al-Ahmed A., Saidur R., Yilbas B.S. A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017. V. 70. P. 1072-1089. DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.012.
27. Sun M., Liu T., Sha H., Li M., Liu T., Wang M., Chen G., Wang J., Jiang D. A review on thermal energy storage with eutectic phase change materials: Fundamentals and applications. *J. Energy Storage.* 2023. V. 68. P. 107713. DOI: 10.1016/j.est.2023.107713.
28. Kazemi Z., Mortazavi S.M., Shahmoradi Ghaten F. Developing a novel thermo-regulating cotton fabric using inorganic eutectic phase change material. *Cellulose.* 2023. V. 30. N 2. P. 1287-1303. DOI: 10.1007/s10570-022-04919-6.
29. Wang W., Zhang Q., Liu L., Sun Y., Wu J., Tao J., Lu X. Fabrication of air-conditioning tussah silk with capric–stearic eutectic mixture for effective energy storage and thermal regulatory applications. *Polym. Int.* 2023. V. 72. N 2. P. 217-229. DOI: 10.1002/pi.6461.
30. Khan M.S.H., Rahaman M.T., Pranta A.D., Hasan M.K. Eco-friendly organic nanomaterials for multifunctional textiles: sources, applications, recent advances and future prospects towards sustainability. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2025. P. 7353-7410. DOI: 10.1007/s13762-024-06299-9.
31. Nikoonahad M., Sadrameli S.M., Arabpour Roghabadi F. Preparation and optimization of nanoencapsulated capric acid being as a renewable phase change material with TiO₂ shell as shape-stabilized thermal energy storage material. *J. of Therm. Analysis and Calorimetry.* 2023. V. 148. N 20. P. 10735-10747. DOI: 10.1007/s10973-023-12436-2.
32. Ao C., Yan S., Zhao S., Hu W., Zhao L., Wu Y. Stearic acid/expanded graphite composite phase change material with high thermal conductivity for thermal energy storage. *Energy Reports.* 2022. V. 8. P. 4834-4843. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.03.172.
33. Ghufuran M., Huitink D. Synthesis of silica-encapsulated myristic acid phase-change-assisted nanocapsules for thermal management applications. *Emergent Mater.* 2024. P. 1-15. DOI: 10.1007/s42247-024-00719-9.
34. Bhutto Y.A., Pandey A.K., Islam A., Rajamony R.K. Lauric acid based form-stable phase change material for effective

- electronic thermal management and energy storage application. *Mater. Today Sustain.* 2024. V. 28. P. 100931. DOI: 10.1016/j.mtsust.2024.100931.
35. Li W., Wang J., Zhang X., Liu X., Dong H. Experimental and numerical investigation of the melting process and heat transfer characteristics of multiple phase change materials. *Internat. J. Energy Res.* 2020. V. 44. N 14. P. 11219-11232. DOI: 10.1002/er.5718.
36. Naresh R., Parameshwaran R., Ram V.V. Microcapsules of n-dodecanoic acid/melamine-formaldehyde with enhanced thermal energy storage capability for solar applications. *J. of Sci.: Adv. Mater. Devices.* 2022. V. 7. N 3. P. 100462. DOI: 10.1016/j.jsamd.2022.100462.
37. Deka P.P., Ansu A.K., Sharma R.K., Tyagi V.V., Sari A. Development and characterization of form-stable porous TiO₂/tetradecanoic acid based composite PCM with long-term stability as solar thermal energy storage material. *Int. J. Energy Res.* 2020. V. 44. N 13. P. 10044-10057. DOI: 10.1002/er.5615.
38. Khademi A., Mehrjardi S.A.A., Said Z., Saidur R., Ushak S. A comparative study of melting behavior of phase change material with direct fluid contact and container inclination. *Energy Nexus.* 2023. V. 10. P. 100196. DOI: 10.1002/er.5615.
39. Tanwar S., Kaur R. Development and investigation of microencapsulated caprylic acid-based phase change materials for thermal energy storage applications. *Int. J. Energy Res.* 2021. V. 45. N 12. P. 17302-17314. DOI: 10.1002/er.6611.
40. Karthikeyan K., Mariappan V., Kalidoss P., Ganesh J.M.J., Kishore P.V.R.N., Prathiban S., Anish R. Characterization and thermal properties of lauryl alcohol-capric acid binary mixture with hybrid-nanoparticles as phase change material for vaccine storage applications. *J. Energy Storage.* 2023. V. 74. P. 109442. DOI: 10.1016/j.est.2023.109442.
41. Reddy V.S., Venkatachalapathy S., Kishore P.V.R.N. Study on thermal performance and flow behavior of myristyl alcohol phase change material microencapsulated with hybrid shell in minichannels. *Appl. Therm. Eng.* 2024. V. 257. P. 124138. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124138.
42. Колядо А.В., Дорохина Е.В., Гаркушин И.К., Шиков А.А. Фазовые равновесия в системах с участием н-эйкозана. *Башикур. Хим. Журн.* 2011. Т. 18. № 3. С. 37-40.
43. Gunjo D.G., Yadav V.K., Sinha D.K., Refaey H.A., Ahmed G.M.S., Abelmohimen M.A.H. Performance of latent heat storage (LHS) systems using pure paraffin wax as working substance. *Case Studies Therm. Eng.* 2022. V. 39. P. 102399. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102399.
44. Zhang H., Wang X., Wu D. Silica encapsulation of n-octadecane via sol-gel process: A novel microencapsulated phase-change material with enhanced thermal conductivity and performance. *J. Colloid Interface Sci.* 2010. V. 343. N 1. P. 246-255. DOI: 10.1016/j.jcis.2009.11.036.
45. Mert M.S., Mert H.H., Arici M. Development and properties of n-octadecane/kaolinite composites as form-stabilized phase change materials for energy storage. *J. Clean. Prod.* 2023. V. 410. P. 137304. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137304.
46. Nguyen G.T., Hwang H.S., Lee J., Cha D.A. Park I. n-Octadecane/fumed silica phase change composite as building envelope for high energy efficiency. *Nanomaterials.* 2021. V. 11. N 3. P. 566. DOI: 10.3390/nano11030566.
47. Do J.Y., Son N., Shin J., Chava R.K., Joo S.W., Kang M. n-Eicosane-Fe₃O₄@ SiO₂@ Cu microcapsule phase change material and its improved thermal conductivity and heat transfer performance. *Mater. Des.* 2021. V. 198. P. 109357. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109357.
- electronic thermal management and energy storage application. *Mater. Today Sustain.* 2024. V. 28. P. 100931. DOI: 10.1016/j.mtsust.2024.100931.
35. Li W., Wang J., Zhang X., Liu X., Dong H. Experimental and numerical investigation of the melting process and heat transfer characteristics of multiple phase change materials. *Internat. J. Energy Res.* 2020. V. 44. N 14. P. 11219-11232. DOI: 10.1002/er.5718.
36. Naresh R., Parameshwaran R., Ram V.V. Microcapsules of n-dodecanoic acid/melamine-formaldehyde with enhanced thermal energy storage capability for solar applications. *J. of Sci.: Adv. Mater. Devices.* 2022. V. 7. N 3. P. 100462. DOI: 10.1016/j.jsamd.2022.100462.
37. Deka P.P., Ansu A.K., Sharma R.K., Tyagi V.V., Sari A. Development and characterization of form-stable porous TiO₂/tetradecanoic acid based composite PCM with long-term stability as solar thermal energy storage material. *Int. J. Energy Res.* 2020. V. 44. N 13. P. 10044-10057. DOI: 10.1002/er.5615.
38. Khademi A., Mehrjardi S.A.A., Said Z., Saidur R., Ushak S. A comparative study of melting behavior of phase change material with direct fluid contact and container inclination. *Energy Nexus.* 2023. V. 10. P. 100196. DOI: 10.1002/er.5615.
39. Tanwar S., Kaur R. Development and investigation of microencapsulated caprylic acid-based phase change materials for thermal energy storage applications. *Int. J. Energy Res.* 2021. V. 45. N 12. P. 17302-17314. DOI: 10.1002/er.6611.
40. Karthikeyan K., Mariappan V., Kalidoss P., Ganesh J.M.J., Kishore P.V.R.N., Prathiban S., Anish R. Characterization and thermal properties of lauryl alcohol-capric acid binary mixture with hybrid-nanoparticles as phase change material for vaccine storage applications. *J. Energy Storage.* 2023. V. 74. P. 109442. DOI: 10.1016/j.est.2023.109442.
41. Reddy V.S., Venkatachalapathy S., Kishore P.V.R.N. Study on thermal performance and flow behavior of myristyl alcohol phase change material microencapsulated with hybrid shell in minichannels. *Appl. Therm. Eng.* 2024. V. 257. P. 124138. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124138.
42. Kolyado A.V., Dorokhina E.V., Garkushin I.K., Shikov A.A. Phase equilibria in systems involving n-eicosane. *Bashkir. Khim. Zhurn.* 2011. V. 18. N 3. P. 37-40 (in Russian).
43. Gunjo D.G., Yadav V.K., Sinha D.K., Refaey H.A., Ahmed G.M.S., Abelmohimen M.A.H. Performance of latent heat storage (LHS) systems using pure paraffin wax as working substance. *Case Studies Therm. Eng.* 2022. V. 39. P. 102399. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102399.
44. Zhang H., Wang X., Wu D. Silica encapsulation of n-octadecane via sol-gel process: A novel microencapsulated phase-change material with enhanced thermal conductivity and performance. *J. Colloid Interface Sci.* 2010. V. 343. N 1. P. 246-255. DOI: 10.1016/j.jcis.2009.11.036.
45. Mert M.S., Mert H.H., Arici M. Development and properties of n-octadecane/kaolinite composites as form-stabilized phase change materials for energy storage. *J. Clean. Prod.* 2023. V. 410. P. 137304. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137304.
46. Nguyen G.T., Hwang H.S., Lee J., Cha D.A. Park I. n-Octadecane/fumed silica phase change composite as building envelope for high energy efficiency. *Nanomaterials.* 2021. V. 11. N 3. P. 566. DOI: 10.3390/nano11030566.
47. Do J.Y., Son N., Shin J., Chava R.K., Joo S.W., Kang M. n-Eicosane-Fe₃O₄@ SiO₂@ Cu microcapsule phase change material and its improved thermal conductivity and heat transfer performance. *Mater. Des.* 2021. V. 198. P. 109357. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109357.

48. Klochko L., Noel J., Sgreva N.R., Leclerc S., Metivier C., Lacroix D., Isaiev M. Thermophysical properties of n-hexadecane: Combined molecular dynamics and experimental investigations. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2022. V. 137. P. 106234. DOI: 10.48550/arXiv.2203.07165.
49. Sari A., Alkan C., Bicer A., Altuntas A., Bilgin C. Micro/nanoencapsulated n-nonadecane with poly (methyl methacrylate) shell for thermal energy storage. *Energy Conver. Manag.* 2014. V. 86. P. 614-621. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.05.092.
50. Ma F., Hou Y., Fu Z., Qin W., Tang Y., Dai J., Wang Y., Peng C. Microencapsulated binary eutectic phase change materials with high energy storage capabilities for asphalt binders. *Constr. Build. Mater.* 2023. V. 392. P. 131814. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131814.
51. Остриков А.Н., Горбатова А.В., Копылов М.В., Аникин А.А. Анализ теплофизических характеристик рапсового масла. *Технол. пищ. и перерабат. промышл. агропромышл. комплекса – продукты здорового питания.* 2017. № 5 (19). С. 107-112.
52. Габитов Р.Р., Накипов Р.Р., Шамсетдинов Ф.Н., Усманов Р.А., Хайруллин И.Х., Зарипов З.И. Переносные свойства растительных масел. *Вестн. Казан. технол. ун-та.* 2012. Т. 15. № 21. С. 25-27.
53. Жосан А.А., Рыжов Ю.Н., Курочкин А.А. Сравнение физико-химических свойств дизельного топлива и рапсового масла. *Вестн. Аграр. Науки.* 2011. Т. 31. № 4. С. 72-73.
54. Saleel C.A. A review on the use of coconut oil as an organic phase change material with its melting process, heat transfer, and energy storage characteristics. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2022. V. 147. N 7. P. 4451-4472. DOI: 10.1007/s10973-021-10839-7.
55. Bogdan A., Loerting T. Impact of substrate, aging, and size on the two freezing events of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ droplets. *J. Phys. Chem.* 2011. V. 115. N 21. P. 10682-10693. DOI: 10.1021/jp2007396.
56. Jenkins B.A., Belsito D.V. Lanolin. *Dermatitis.* 2023. V. 34. N 1. P. 4-12. DOI: 10.1089/derm.2022.0002.
57. El-Shemy N.S., El-Hawary N.S., Haggag K., El-Sayed H. Utilization of lanolin in microwave-assisted pigment printing of textiles. *Egypt. J. Chem.* 2020. V. 63. N 9. P. 3259-3269. DOI: 10.21608/ejchem.2020.28300.2608.
58. Pownraj C., Valan Arasu A. Effect of dispersing single and hybrid nanoparticles on tribological, thermo-physical, and stability characteristics of lubricants: a review. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2021. V. 143. N 2. P. 1773-1809. DOI: 10.1007/s10973-020-09837-y.
59. Appaiah P., Sunil L., Prasanth Kumar P.K., Gopala Krishna A.G. Composition of coconut testa, coconut kernel and its oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 2014. V. 91. N 6. P. 917-924. DOI: 10.1007/s11746-014-2447-9.
60. Wijayanto T., Santoso A., Witono R. Effects of coconut oil and palm oil based Phase Change Material as cooling device in alleviating heat strain during physical activity in hot-humid condition. 4th SEANES Internat. Conf. on Human Factors and Ergonomics in South-East Asia. 2016. P. 163-167. DOI: 10.1063/1.4982281.
61. Ong P.J., Goh S.H.A., Leow Y., Wang S., Wang P., Li Z., Yin X., Tan B.H., Thirsartarn W., Xu J. Valorization of coconut peat to develop a novel shape-stabilized phase change material for thermal energy storage. *J. Clean. Prod.* 2024. V. 446. P. 141468. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141468.
62. Huang J., Luo Y., Weng M., Yu J., Sun L., Zeng H., Liu Y., Zeng W., Min Y., Guo Z. Advances and applications of
48. Klochko L., Noel J., Sgreva N.R., Leclerc S., Metivier C., Lacroix D., Isaiev M. Thermophysical properties of n-hexadecane: Combined molecular dynamics and experimental investigations. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2022. V. 137. P. 106234. DOI: 10.48550/arXiv.2203.07165.
49. Sari A., Alkan C., Bicer A., Altuntas A., Bilgin C. Micro/nanoencapsulated n-nonadecane with poly (methyl methacrylate) shell for thermal energy storage. *Energy Conver. Manag.* 2014. V. 86. P. 614-621. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.05.092.
50. Ma F., Hou Y., Fu Z., Qin W., Tang Y., Dai J., Wang Y., Peng C. Microencapsulated binary eutectic phase change materials with high energy storage capabilities for asphalt binders. *Constr. Build. Mater.* 2023. V. 392. P. 131814. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131814.
51. Ostrikov A.N., Gorbatoва A.V., Kopylov M.V., Anikin A.A. Analysis of thermophysical characteristics of rapeseed oil. *Tekhnol. Pichsh. Pererabot. Promysh. Agro-Promysh. Kompl. _ Produkt. Zdorov. Pitan.* 2017. N 5 (19). P. 107-112 (in Russian).
52. Gabitov R.R., Nakipov R.R., Shamsetdinov F.N., Usmanov R.A., Khairullin I.H., Zaripov Z.I. Portable properties of vegetable oils. *Vestn. Kazan. Tekhnolog. Univ.* 2012. V. 15. N 21. P. 25-27 (in Russian).
53. Zhosan A.A., Ryzhov Yu.N., Kurochkin A.A. Comparison of physico-chemical properties of diesel fuel and rapeseed oil. *Vestn. Agrar. Nauki.* 2011. V. 31. N 4. P. 72-73 (in Russian).
54. Saleel C.A. A review on the use of coconut oil as an organic phase change material with its melting process, heat transfer, and energy storage characteristics. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2022. V. 147. N 7. P. 4451-4472. DOI: 10.1007/s10973-021-10839-7.
55. Bogdan A., Loerting T. Impact of substrate, aging, and size on the two freezing events of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$ droplets. *J. Phys. Chem.* 2011. V. 115. N 21. P. 10682-10693. DOI: 10.1021/jp2007396.
56. Jenkins B.A., Belsito D.V. Lanolin. *Dermatitis.* 2023. V. 34. N 1. P. 4-12. DOI: 10.1089/derm.2022.0002.
57. El-Shemy N.S., El-Hawary N.S., Haggag K., El-Sayed H. Utilization of lanolin in microwave-assisted pigment printing of textiles. *Egypt. J. Chem.* 2020. V. 63. N 9. P. 3259-3269. DOI: 10.21608/ejchem.2020.28300.2608.
58. Pownraj C., Valan Arasu A. Effect of dispersing single and hybrid nanoparticles on tribological, thermo-physical, and stability characteristics of lubricants: a review. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2021. V. 143. N 2. P. 1773-1809. DOI: 10.1007/s10973-020-09837-y.
59. Appaiah P., Sunil L., Prasanth Kumar P.K., Gopala Krishna A.G. Composition of coconut testa, coconut kernel and its oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 2014. V. 91. N 6. P. 917-924. DOI: 10.1007/s11746-014-2447-9.
60. Wijayanto T., Santoso A., Witono R. Effects of coconut oil and palm oil based Phase Change Material as cooling device in alleviating heat strain during physical activity in hot-humid condition. 4th SEANES Internat. Conf. on Human Factors and Ergonomics in South-East Asia. 2016. P. 163-167. DOI: 10.1063/1.4982281.
61. Ong P.J., Goh S.H.A., Leow Y., Wang S., Wang P., Li Z., Yin X., Tan B.H., Thirsartarn W., Xu J. Valorization of coconut peat to develop a novel shape-stabilized phase change material for thermal energy storage. *J. Clean. Prod.* 2024. V. 446. P. 141468. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141468.
62. Huang J., Luo Y., Weng M., Yu J., Sun L., Zeng H., Liu Y., Zeng W., Min Y., Guo Z. Advances and applications of

- phase change materials (PCMs) and PCMs-based technologies. *ES Mater. Manuf.* 2021. V. 13. P. 23-39. DOI: 10.30919/esmm5f458.
63. **Palacios A.A., Navaro-Rivero M.E., Zou B., Jiang Z., Harisson M.T., Ding Y.** A perspective on Phase Change Material encapsulation: Guidance for encapsulation design methodology from low to high-temperature thermal energy storage applications. *J. Energy Storage.* 2023. V. 72. P. 108597. DOI: 10.1016/j.est.2023.108597.
64. **Wang R., He Y., Xiao Y., Sun D., Yang J., Qi X., Wang Y.** Weavable phase change fibers with wide thermal management temperature range, reversible thermochromic and triple shape memory functions towards human thermal management. *Eur. Polym. J.* 2023. V. 187. P. 111890. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.111890.
65. **Mengjin J., Xiaoqing S., Jianjun X., Guangdou Y.** Preparation of a new thermal regulating fiber based on PVA and paraffin. *Solar Energy Mater. Solar Cells.* 2008. V. 92. N 12. P. 1657-1660. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.07.018.
66. **Cimino C., Maurel O.M., Musumeci T., Bonacorso A., Drago F., Souto E.M.B., Pignatello R.** Essential oils: Pharmaceutical applications and encapsulation strategies into lipid-based delivery systems. *Pharmaceutics.* 2021. V. 13. N 3. P. 327. DOI: 10.3390/pharmaceutics13030327.
67. **Zabot G.L., Schaefer Rodrigues F., Polano Ody L., Vinicius Tres M., Herrera E., Palacin H.** Encapsulation of bioactive compounds for food and agricultural applications. *Polymers.* 2022. V. 14. N 19. P. 4194. DOI: 10.3390/polym14194194.
68. **Brandau T.** Annular nozzle in laminar flow encapsulation processes. Microencapsulation in the Food Industry. Academic Press. 2023. P. 137-154. DOI: 10.1016/B978-0-12-821683-5.00020-0.
69. **Chaudhary Z., Subramaniam S., Khan G.M., Abeer M.M., Qu Z., Janjua T., Kumeria T., Batra J., Popat A.** Encapsulation and controlled release of resveratrol within functionalized mesoporous silica nanoparticles for prostate cancer therapy. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2019. V. 7. P. 225. DOI: 10.3389/fbioe.2019.00225.
70. **Choudhury N., Meghwal M., Das K.** Microencapsulation: An overview on concepts, methods, properties and applications in foods. *Food Front.* 2021. V. 2. N 4. P. 426-442. DOI: 10.1002/fft2.94.
71. **González-Ferrero C., Irache J.M., González-Navarro C.J.** Soybean protein-based microparticles for oral delivery of probiotics with improved stability during storage and gut resistance. *Food Chem.* 2018. V. 239. P. 879-888. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.07.022.
72. **Sadchaiyaphum J., Phapugrangkul P., Chaiyasat P., Chaiyasata A.** High Encapsulation Efficiency of Magnetite Nanoparticles in Hydrophobic Polymer Microcapsules Using Microsuspension Conventional Radical Polymerization. *Orient. J. Chem.* 2019. V. 35. N 2. DOI: 10.13005/ojc/350202.
73. **Sousa V.I., Parente J.F., Marques J.F., Forte M.A., Tavares C.J.** Microencapsulation of essential oils: A review. *Polymers.* 2022. V. 14. N 9. P. 1730. DOI: 10.3390/polym14091730.
74. **Lipina A.A., Petrova L.S., Erzunov K.A., Odintsova O.I., Il'icheva M.D.** Finishing of Textiles with Microencapsulated Acaricidal and Repellent Compounds. *Fibre Chem.* 2022. V. 53. N 6. P. 412-414. DOI: 10.1007/s10692-022-10316-3.
75. **Ramdhan T., Ching S.H., Prakash S., Bhandari B.** Physical and mechanical properties of alginate based composite gels. *Trends Food Sci. Technol.* 2020. V. 106. P. 150-159. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.10.002.
- phase change materials (PCMs) and PCMs-based technologies. *ES Mater. Manuf.* 2021. V. 13. P. 23-39. DOI: 10.30919/esmm5f458.
63. **Palacios A.A., Navaro-Rivero M.E., Zou B., Jiang Z., Harisson M.T., Ding Y.** A perspective on Phase Change Material encapsulation: Guidance for encapsulation design methodology from low to high-temperature thermal energy storage applications. *J. Energy Storage.* 2023. V. 72. P. 108597. DOI: 10.1016/j.est.2023.108597.
64. **Wang R., He Y., Xiao Y., Sun D., Yang J., Qi X., Wang Y.** Weavable phase change fibers with wide thermal management temperature range, reversible thermochromic and triple shape memory functions towards human thermal management. *Eur. Polym. J.* 2023. V. 187. P. 111890. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2023.111890.
65. **Mengjin J., Xiaoqing S., Jianjun X., Guangdou Y.** Preparation of a new thermal regulating fiber based on PVA and paraffin. *Solar Energy Mater. Solar Cells.* 2008. V. 92. N 12. P. 1657-1660. DOI: 10.1016/j.solmat.2008.07.018.
66. **Cimino C., Maurel O.M., Musumeci T., Bonacorso A., Drago F., Souto E.M.B., Pignatello R.** Essential oils: Pharmaceutical applications and encapsulation strategies into lipid-based delivery systems. *Pharmaceutics.* 2021. V. 13. N 3. P. 327. DOI: 10.3390/pharmaceutics13030327.
67. **Zabot G.L., Schaefer Rodrigues F., Polano Ody L., Vinicius Tres M., Herrera E., Palacin H.** Encapsulation of bioactive compounds for food and agricultural applications. *Polymers.* 2022. V. 14. N 19. P. 4194. DOI: 10.3390/polym14194194.
68. **Brandau T.** Annular nozzle in laminar flow encapsulation processes. Microencapsulation in the Food Industry. Academic Press. 2023. P. 137-154. DOI: 10.1016/B978-0-12-821683-5.00020-0.
69. **Chaudhary Z., Subramaniam S., Khan G.M., Abeer M.M., Qu Z., Janjua T., Kumeria T., Batra J., Popat A.** Encapsulation and controlled release of resveratrol within functionalized mesoporous silica nanoparticles for prostate cancer therapy. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2019. V. 7. P. 225. DOI: 10.3389/fbioe.2019.00225.
70. **Choudhury N., Meghwal M., Das K.** Microencapsulation: An overview on concepts, methods, properties and applications in foods. *Food Front.* 2021. V. 2. N 4. P. 426-442. DOI: 10.1002/fft2.94.
71. **González-Ferrero C., Irache J.M., González-Navarro C.J.** Soybean protein-based microparticles for oral delivery of probiotics with improved stability during storage and gut resistance. *Food Chem.* 2018. V. 239. P. 879-888. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.07.022.
72. **Sadchaiyaphum J., Phapugrangkul P., Chaiyasat P., Chaiyasata A.** High Encapsulation Efficiency of Magnetite Nanoparticles in Hydrophobic Polymer Microcapsules Using Microsuspension Conventional Radical Polymerization. *Orient. J. Chem.* 2019. V. 35. N 2. DOI: 10.13005/ojc/350202.
73. **Sousa V.I., Parente J.F., Marques J.F., Forte M.A., Tavares C.J.** Microencapsulation of essential oils: A review. *Polymers.* 2022. V. 14. N 9. P. 1730. DOI: 10.3390/polym14091730.
74. **Lipina A.A., Petrova L.S., Erzunov K.A., Odintsova O.I., Il'icheva M.D.** Finishing of Textiles with Microencapsulated Acaricidal and Repellent Compounds. *Fibre Chem.* 2022. V. 53. N 6. P. 412-414. DOI: 10.1007/s10692-022-10316-3.
75. **Ramdhan T., Ching S.H., Prakash S., Bhandari B.** Physical and mechanical properties of alginate based composite gels. *Trends Food Sci. Technol.* 2020. V. 106. P. 150-159. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.10.002.

76. Sharma K., Porat Z., Gedanken A. Designing natural polymer-based capsules and spheres for biomedical applications—a review. *Polymers*. 2021. V. 13. N 24. P. 4307. DOI: 10.3390/polym13244307.
77. Pretzl M., Neubauer M., Tekaht M., Kunert C., Leon G., Berthier D., Emi P., Ouali L. Formation and mechanical characterization of aminoplast core/shell microcapsules. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2012. V. 4. N 6. P. 2940-2948. DOI: 10.1021/am300273b.
78. León G., Paret N., Fankhauser P., Grenno D., Erni P., Ouali L., Berthier D.L. Formaldehyde-free melamine microcapsules as core/shell delivery systems for encapsulation of volatile active ingredients. *Rsc Adv*. 2017. V. 7. N 31. P. 18962-18975. DOI: 10.1039/C7RA01413A.
79. Одинцова О.И., Владимирцева Е.Л., Козлова О.В., Смирнова С.В., Липина А.А., Петрова Л.С., Ерзунов К.А., Константинова З.А., Зимнуров А.Р., Быков Ф.А., Мельников А.Г. Отделка текстильных материалов микрокапсулами и наночастицами функциональных веществ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 173-184. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6844j.
80. Demirbağ S., Aksoy S.A. Encapsulation of phase change materials by complex coacervation to improve thermal performances and flame retardant properties of the cotton fabrics. *Fibers Polym.* 2016. V. 17. P. 408-417. DOI: 10.1007/s12221-016-5113-z.
81. Li M., Rouaud O., Poncelet D. Microencapsulation by solvent evaporation: State of the art for process engineering approaches. *Internat. J. Pharm.* 2008. V. 363. N 1-2. P. 26-39. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2008.07.018.
82. Freitas S., Merkle H.P., Gander B. Microencapsulation by solvent extraction/evaporation: reviewing the state of the art of microsphere preparation process technology. *J. Control. Releases*. 2005. V. 102. N 2. P. 313-332. DOI: 10.1016/j.jconrel.2004.10.015.
83. Goetzendorf-Grabowska B., Polus Z., Kiwala M., Karaszewska A., Kaminska I., Maczka I. Antibacterial air filter nonwovens modified by poly (lactide) microspheres containing triclosan. *Fibres Text. Eastern Europe*. 2015. N 1.109. P. 114-119.
84. Aggarwal A.K., Dayal A., Kumar N. Microencapsulation processes and applications in textile processing. *Colourage*. 1998. V. 45. N 8.
85. Voncina B., Vivod V. Cyclodextrins in textile finishing. *Eco-friend. Text. Dyeing Finish.* 2013. P. 53-75. DOI: 10.5772/53777.
86. Nagavarma B.V.N., Sandeep K., Punam G. Different techniques for preparation of polymeric nanoparticles-a review. *Asian J. Pharm. Clin. Res.* 2012. V. 5. N 3. P. 16-23. DOI: 10.22270/jddt.v10i6-s.4398.
87. Липина А.А., Петрова Л.С., Одинцова О.И., Козлова О.В., Владимирцева Е.Л., Смирнова С.В., Ильичёва М.Д. Микрокапсулирование активных фрагментов биополимеров, содержащих дипептиды Тир-Про-гидрохлорид. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 97-104. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6628.
88. Петрова Л.С., Яминзода З.А., Одинцова О.И., Владимирцева Е.Л., Соловьева А.А., Смирнова А.С. Перспективные способы антибактериальной отделки текстильных материалов. *Росс. хим. журн.* 2021. Т. 65. № 2. С. 67-82. DOI: 10.6060/rcj.2021652.6.
89. Arshady R. Preparation of microspheres and microcapsules by interfacial polycondensation techniques. *J. Microencapsulat.* 1989. V. 6. N 1. P. 13-28. DOI: 10.3109/02652048909019898.
76. Sharma K., Porat Z., Gedanken A. Designing natural polymer-based capsules and spheres for biomedical applications—a review. *Polymers*. 2021. V. 13. N 24. P. 4307. DOI: 10.3390/polym13244307.
77. Pretzl M., Neubauer M., Tekaht M., Kunert C., Leon G., Berthier D., Emi P., Ouali L. Formation and mechanical characterization of aminoplast core/shell microcapsules. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2012. V. 4. N 6. P. 2940-2948. DOI: 10.1021/am300273b.
78. León G., Paret N., Fankhauser P., Grenno D., Erni P., Ouali L., Berthier D.L. Formaldehyde-free melamine microcapsules as core/shell delivery systems for encapsulation of volatile active ingredients. *Rsc Adv*. 2017. V. 7. N 31. P. 18962-18975. DOI: 10.1039/C7RA01413A.
79. Odintsova O.I., Vladimirtseva E.L., Kozlova O.V., Smirnova S.V., Lipina A.A., Petrova L.S., Erzunov K.A., Konstantinova Z.A., Zimnurov A.R., Bykov F.A., Melnikov A.G. Finishing of textile materials with microcapsules and nanoparticles of functional substances. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 173-184 (in Russian) DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6844j.
80. Demirbağ S., Aksoy S.A. Encapsulation of phase change materials by complex coacervation to improve thermal performances and flame retardant properties of the cotton fabrics. *Fibers Polym.* 2016. V. 17. P. 408-417. DOI: 10.1007/s12221-016-5113-z.
81. Li M., Rouaud O., Poncelet D. Microencapsulation by solvent evaporation: State of the art for process engineering approaches. *Internat. J. Pharm.* 2008. V. 363. N 1-2. P. 26-39. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2008.07.018.
82. Freitas S., Merkle H.P., Gander B. Microencapsulation by solvent extraction/evaporation: reviewing the state of the art of microsphere preparation process technology. *J. Control. Releases*. 2005. V. 102. N 2. P. 313-332. DOI: 10.1016/j.jconrel.2004.10.015.
83. Goetzendorf-Grabowska B., Polus Z., Kiwala M., Karaszewska A., Kaminska I., Maczka I. Antibacterial air filter nonwovens modified by poly (lactide) microspheres containing triclosan. *Fibres Text. Eastern Europe*. 2015. N 1.109. P. 114-119.
84. Aggarwal A.K., Dayal A., Kumar N. Microencapsulation processes and applications in textile processing. *Colourage*. 1998. V. 45. N 8.
85. Voncina B., Vivod V. Cyclodextrins in textile finishing. *Eco-friend. Text. Dyeing Finish.* 2013. P. 53-75. DOI: 10.5772/53777.
86. Nagavarma B.V.N., Sandeep K., Punam G. Different techniques for preparation of polymeric nanoparticles-a review. *Asian J. Pharm. Clin. Res.* 2012. V. 5. N 3. P. 16-23. DOI: 10.22270/jddt.v10i6-s.4398.
87. Lipina A.A., Petrova L.S., Odintsova O.I., Kozlova O.V., Vladimirtseva E.L., Smirnova S.V., Ilyicheva M.D. Microencapsulation of active fragments of biopolymers containing Tyr-Pro-hydrochloride dipeptides. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 97-104 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6628.
88. Petrova L.S., Yaminzoda Z.A., Odintsova O.I., Vladimirtseva E.L., Solovyova A.A., Smirnova A.S. Promising methods of antibacterial finishing of textile materials. *Ros. Khim. Zhurn.* 2021. V. 65. N 2. P. 67-82 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2021652.6.
89. Arshady R. Preparation of microspheres and microcapsules by interfacial polycondensation techniques. *J. Microencapsulat.* 1989. V. 6. N 1. P. 13-28. DOI: 10.3109/02652048909019898.

90. **Arshady R., George M.H.** Suspension, dispersion, and interfacial polycondensation: A methodological survey. *Polym. Eng. Sci.* 1993. V. 33. N 14. P. 865-876. DOI: 10.1002/pen.760331402.
91. **Sánchez L., Sanchez P., A de Lucas, Carmona M., Rodríguez J.F.** Microencapsulation of PCMs with a polystyrene shell. *Colloid Polym. Sci.* 2007. V. 285. P. 1377-1385. DOI: 10.1007/s00396-007-1696-7.
92. **Yafei A., Yong J., Jing S., Deqing W.** Microencapsulation of n-hexadecane as phase change material by suspension polymerization. *e-Polymers*. 2007. V. 7. N. 1. P. 098. DOI:10.1515/epoly.2007.7.1.1124.
93. **Sánchez-Silva L., Rodríguez J.F., Carmona M., Romero A., Sanchez P.** Thermal and morphological stability of polystyrene microcapsules containing phase-change materials. *J. Appl. Polym. Sci.* 2011. V. 120. N 1. P. 291-297. DOI:10.1002/app.33112.
94. **Bône S., Vautrin C., Barbesant V., Truchon S., Harrison I., Geffroy C.** Microencapsulated fragrances in melamine formaldehyde resins: International year of chemistry. *Chimia*. 2011. V. 65. N. 3. P. 177-177. DOI: 10.2533/chimia.2011.177.
95. **Nguon O., Lagugne-Labarthet F., Brandys F.A., Li J., Gillies E.R.** Microencapsulation by in situ polymerization of amino resins. *Polym. Rev.* 2018. V. 58. N 2. P. 326-375. DOI: 10.1080/15583724.2017.1364765.
96. **Duan B., Lensen D., Vriezema D.M., Hest van J.C.M.** Microencapsulation via In Situ Polymerization. Handbook of encapsulation and controlled release. 2015. P. 307. DOI: 10.1002/mabi.200800112.
90. **Arshady R., George M.H.** Suspension, dispersion, and interfacial polycondensation: A methodological survey. *Polym. Eng. Sci.* 1993. V. 33. N 14. P. 865-876. DOI: 10.1002/pen.760331402.
91. **Sánchez L., Sanchez P., A de Lucas, Carmona M., Rodríguez J.F.** Microencapsulation of PCMs with a polystyrene shell. *Colloid Polym. Sci.* 2007. V. 285. P. 1377-1385. DOI: 10.1007/s00396-007-1696-7.
92. **Yafei A., Yong J., Jing S., Deqing W.** Microencapsulation of n-hexadecane as phase change material by suspension polymerization. *e-Polymers*. 2007. V. 7. N. 1. P. 098. DOI:10.1515/epoly.2007.7.1.1124.
93. **Sánchez-Silva L., Rodríguez J.F., Carmona M., Romero A., Sanchez P.** Thermal and morphological stability of polystyrene microcapsules containing phase-change materials. *J. Appl. Polym. Sci.* 2011. V. 120. N 1. P. 291-297. DOI:10.1002/app.33112.
94. **Bône S., Vautrin C., Barbesant V., Truchon S., Harrison I., Geffroy C.** Microencapsulated fragrances in melamine formaldehyde resins: International year of chemistry. *Chimia*. 2011. V. 65. N. 3. P. 177-177. DOI: 10.2533/chimia.2011.177.
95. **Nguon O., Lagugne-Labarthet F., Brandys F.A., Li J., Gillies E.R.** Microencapsulation by in situ polymerization of amino resins. *Polym. Rev.* 2018. V. 58. N 2. P. 326-375. DOI: 10.1080/15583724.2017.1364765.
96. **Duan B., Lensen D., Vriezema D.M., Hest van J.C.M.** Microencapsulation via In Situ Polymerization. Handbook of encapsulation and controlled release. 2015. P. 307. DOI: 10.1002/mabi.200800112.

Поступила в редакцию 14.03.2025

Принята к опубликованию 11.04.2025

Received 14.03.2025

Accepted 11.04.2025