

## ТЕХНОЛОГИИ ПРИДАНИЯ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ\*

### TECHNOLOGIES FOR IMPARTING THERMOREGULATORY PROPERTIES TO TEXTILE MATERIALS

А.Ф. АЛЁХИНА, К.А. ЕРЗУНОВ, О.И. ОДИНЦОВА

A.F. ALYOKHINA, K.A. ERZUNOV, O.I. ODINTSOVA

(Ивановский государственный химико-технологический университет)

(Ivanovo State University of Chemistry and Technology)

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

*Регулирование температуры тела имеет особое значение для здоровья и производительности труда человека. Текстильные изделия, обладающие терморегулирующими свойствами, могут поддерживать оптимальную температуру тела в различных условиях: проявлять охлаждающий эффект при высокой температуре и сохранять тепло при низкой. Существуют различные методы получения материалов с терморегулирующими свойствами: создание интеллектуальных волокон, внедрение специализированной электроники, создание текстиля на основе принципов ИК-пропускания и ИК-отражения, мембранные технологии, инновационная методика микрокапсулирования веществ с фазовым переходом. Разработанные технологии обеспечивают создание широкого спектра материалов и изделий различного назначения, которые включают повседневную одежду, одежду специального и медицинского назначения, спортивные товары, постельное белье и другие текстильные изделия. Рассмотрены вещества, способные переходить из твердого состояния в жидкое, поглощать избыточное тепло, отдавать его при снижении температуры. Оценена возможность использования описанных функциональных препаратов в технологии микрокапсулирования. Описаны основные преимущества данного метода при создании терморегулирующих текстильных материалов.*

*Regulating body temperature is particularly important for human health and productivity. Textiles with thermoregulatory properties can maintain optimal body temperature in various conditions: exhibit a cooling effect at high temperatures and retain heat at low temperatures. There are various methods for obtaining materials with thermoregulatory properties: creation of intelligent fibers, introduction of specialized electronics, creation of textiles based on the principles of IR transmission and IR reflection, membrane technologies, innovative methods of microencapsulation of substances with phase transition. The developed technologies ensure the creation of a wide range of materials and products for various purposes, which include casual clothing, clothing for special and medical purposes, sporting goods, bed linen and other textile products. Substances that can pass from a solid to a liquid state, absorb excess heat, and release it when the temperature decreases are considered.*

---

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

*The possibility of using the described functional drugs in microencapsulation technology was assessed. The main advantages of this method in the creation of temperature-regulating textile materials are described.*

**Ключевые слова:** текстильные материалы, терморегулирующие свойства, вещества с фазовым переходом, микрокапсулирование, поглощение тепла, отдача тепла, инкапсулированные текстильные материалы.

**Keywords:** textile materials, thermoregulating properties, phase change materials, microencapsulation, heat absorption, heat dissipation, encapsulated textile materials.

### *Введение*

Производство текстильных материалов с терморегулирующими свойствами является одной из наиболее актуальных тем [1]. В условиях нестабильной климатической обстановки, сопровождающейся резкими колебаниями температуры и влажности воздуха, возрастает потребность в использовании улучшенных типов текстиля, способных эффективно регулировать микроклимат нашего тела [2]. Придание текстильным материалам терморегулирующих свойств способствует созданию комфортного микроклимата для человека не только в тяжелых условиях труда, но и в повседневной жизни, защищая организм от неблагоприятных температурных воздействий и значительно снижая риски для здоровья.

Такие материалы находят широкое применение в различных сферах жизни, где напрямую приходится сталкиваться с проблемой поддержания оптимальной температуры для стабильного функционирования. Текстильные материалы с уникальными характеристиками терморегуляции получили широкое применение во многих отраслях. К примеру, их можно использовать для производства спортивной, медицинской и специальной одежды, постельного белья и других изделий. Такая одежда обеспечивает защиту организма от риска перегрева или охлаждения во время физических нагрузок [3]. Эти материалы также применяются для изготовления одежды специального назначения, предназначенной поддерживать оптимальную температуру тела работников, проводящих много времени в условиях высоких или низких температур

[4]. Текстиль с терморегулирующей способностью на сегодня является неотъемлемой частью нашей жизни и продолжает развиваться для обеспечения максимального комфорта и удовлетворения потребностей в поддержании благоприятной температуры для жизнедеятельности организма.

### *Технологии придания текстильным материалам терморегулирующих свойств*

Развитие новых технологий приводит к росту потребностей человека, который стремится следовать инновациям для обеспечения комфортного существования. Выбор текстильных изделий из их широкого спектра в этом случае имеет не столько эстетическую, а сколько практическую значимость. В зависимости от погодных условий, микроклимата помещений люди выбирают текстильные изделия, основываясь на функциональных свойствах, которые позволят поддерживать оптимальную температуру тела.

Для достижения комфорта и предотвращения пагубных воздействий на здоровье человек предпочитает использовать предметы одежды, сделанные из натуральных волокон, которые характеризуются особым строением и свойствами. Они отличаются от других типов волокон благодаря ряду преимуществ, таких как экологичность, способность обеспечивать циркуляцию воздуха и дышащие свойства, а также поглощать и отводить влагу. Изделия из тканей на основе волокон натурального происхождения (растительного, животного, минерального) обладают высокой прочностью, долговечностью, способны проявлять терморегулирующие свойства [5].

Шерсть является одним из самых древних материалов с терморегулирующими свойствами, который помогает сохранять тепло [6]. Шерсть использовалась жителями неолитической эпохи для создания прочной и теплой ткани, особенно необходимой в холодных климатах и ограниченных условиях доступа к другим материалам [2]. Волокно данного типа имеет особенное строение, состоит из трех слоев: чешуйчатый, корковый, сердцевинный. Поверхностный чешуйчатый слой предохраняет шерсть от атмосферных воздействий и механических повреждений и определяет ее способность к свойлачиваемости. Кашемир и мериносковая шерсть обладают высокой теплоизоляционной способностью, при этом кашемир по праву считается самым «теплым» материалом из-за его возможности сохранять тепло в семь-восемь раз лучше, чем шерсть других животных [7].

Льняные ткани обладают отличной воздухопроницаемостью, что позволяет коже «дышать». Для льняных волокон характерны более высокая гигроскопичность и теплопроводность в сравнении с хлопковыми. Таким образом, изделия из льна способны проявлять охлаждающий эффект в жаркую погоду, что, несомненно, повышает актуальность изделий из льна в летний период времени [3]. Шелк является природным теплоизолятором. Охлаждающие свойства объясняются наличием в шелковых нитях неупорядоченных полостей нанометрового размера, для которых характерен интерференционный эффект при рассеянии падающего света. Ткани из натурального шелка отличаются природной воздухопроницаемостью за счет особенностей структуры, высокой влагопоглощающей способностью, что обеспечивает регуляцию отвода тепла [8].

Натуральные волокна имеют хорошую терморегулирующую способность, однако они удобны для эксплуатации не во всех температурных условиях и сферах деятельности. Терморегулирующая одежда должна не только выполнять функцию сохранения тепла и поддержания комфортной температуры внутри, но и быть удобной и функциональной. Инженеры-технологи, ученые и

исследователи продолжают поиск альтернатив волокнам шерсти, льна, хлопка и шелка с целью создания тканей с аналогичными или улучшенными свойствами. Проводятся разработки инновационных материалов с многофункциональными свойствами, стремительно развиваются технологии устойчивой отделки текстильных материалов с целью обеспечения долговременного проявления заданных свойств.

В отличие от натуральных волокон, синтетические волокна гибкие и эластичные, с высокими прочностными характеристиками, производятся по современным технологиям, что делает их более доступными и дешевыми для производства. Кроме того, некоторые типы синтетических волокон могут быть получены с учетом экологических требований, например, с использованием вторичного сырья или технологий, уменьшающих негативное воздействие на окружающую среду. Широко используются синтетические волокна полые внутри, имеющие особенную структуру и, соответственно, терморегулирующие свойства. Большинство утеплителей с теплоизоляционными свойствами производятся на основе волокон такого типа [3]. Чтобы получить материалы с эффективным проявлением терморегулирующих свойств, создают композиции, включающие смесь волокон натурального и синтетического происхождения [4].

В настоящее время все более широкое применение находят ткани из синтетических волокон с мембранным покрытием. В основе изготовления мембранных тканей лежит закрепление различных мембранных пленок на поверхности текстильного материала, которые за счет своей особенной структуры способны проявлять, например, такие свойства, как водоотталкивание и воздухопроницаемость. Мембранные ткани получают нанесением политетрафторэтилена, в результате чего на текстильном материале образуется тонкая поверхностная пористая пленка. Тефлоновая пропитка представляет собой нанесение полимеризованного тетрафторэтилена – вещества, имеющего второе название «фторопласт». Так называемые «мембраны» обладают ветро-

защитными и водоизоляционными свойствами, не препятствуя осуществлению «дыхания» кожи. Такие материалы находят широкое применение в изготовлении одежды для активного отдыха и спорта [9]. Однако утеплители на основе синтетических волокон и мембранные ткани имеют ряд минусов: ограничение воздухообмена и малая эффективность при высокой влажности, неспособность к самоочищению, высокая стоимость, некоторые типы материалов могут вызывать аллергические реакции [10].

В [11] предложен способ получения влагонепроницаемых мембран из нановолокон посредством одностадийного электроформования из гидрофобного полиуретана с включениями оксида кремния и стеариновой кислоты, которая действует как материал с фазовым переходом. Данная технология не ограничивает дышащие свойства материала, кроме того, позволяет получить материалы с высокой прочностью и выдающимися терморегулирующими свойствами (скрытое тепло – 40 Дж/г), что позволяет использовать их в различных сферах жизни.

Широко развивается производство дублированных материалов, проявляющих дышащие свойства, способных обеспечивать защиту от низких температур, впитывать излишнюю влагу и выводить наружу, предотвращая перегрев и потоотделение. Сочетание в материале натуральных волокон позволяет добиться улучшенных адгезионных свойств [12].

В [13] методом клеевого склеивания получен трехслойный нетканый композиционный материал, состоящий из овечьей шерсти и хлопкового трикотажа, между слоями расположен полимерный клей (рис. 1: 1 – трикотажная ткань; 2 – клеевой слой; 3 – овечья шерсть; 4 – трикотажное полотно). Соединение слоев осуществлялось методом термического дублирования при температуре  $150 \pm 5^\circ\text{C}$  в течение  $2,0 \pm 0,2$  минуты.

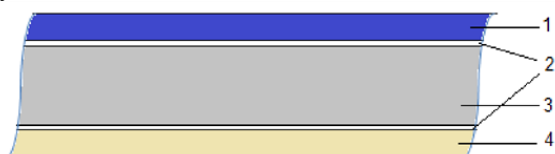


Рис. 1

В процессе термического воздействия расплавленный полимер диффундирует как в структуру шерсти, так и трикотажного полотна, что приводит к увеличению толщины клеевого слоя и прочности скрепления слоев. Сорбция и отличная адгезия расплавленного полимера к волокнам обеспечивают монолитность и прочность композиционного материала, высокую теплозащиту и воздухопроницаемость. Однако изделия, изготовленные с применением таких материалов, являются дорогостоящими, требуют специализированного ухода, склонны к усадке и потере формы в процессе стирок и сушки [14].

Активно развивается один из передовых способов получения текстильных материалов с терморегулирующими свойствами на основе внедрения «умной» электроники. В [15] описаны преимущества специализированной электроники, использование которой в создании текстильных изделий обеспечивает фиксированный уровень температуры независимо от внутреннего микроклимата и внешних климатических условий во время эксплуатации текстильного материала. В данной технологии распределение тепла осуществлялось за счет специальных металлических нитей, напрямую связанных с электронным прибором. Продемонстрирована возможность использования системы регулирования температуры за счет включения-выключения питания электронного прибора. После выключения устройства и последующего включения температура вновь изменялась до оптимального значения и сохранялась в постоянном режиме.

Терморегулирующие свойства материалов могут быть полезными в медицине (термотерапии). В [16] рассмотрена возможность включения в текстильное изделие электронных сетей из металлических нановолокон, которым свойственны высокая степень гибкости, проводимости и газопроницаемости. Сети распределяются в два слоя: один обеспечивает нагревание и распределение тепла, а второй используется в качестве датчика температуры. Волокна данного типа связаны с электронной «интеллекту-

альной» системой управления, за счет которой возможно регулировать оптимальную температуру. Нагрев металлических нитей осуществляется путем прохождения тока низкого напряжения.

#### *Современный охлаждающий текстиль*

В области охлаждающего текстиля основным подходом является создание условий для обеспечения быстрого отвода тепла человеческого тела [17]. Существует четыре широко используемых метода охлаждения одежды: воздушный, жидкостный, с фазовым переходом и с испарительным охлаждением [18, 19], снимающие чрезмерный тепловой стресс человеческого тела. Однако такая одежда имеет заметные недостатки: тяжелая, энергоемкая и непригодная для обычного человека [20, 21].

Хлопок, лен и синтетические волокна являются распространенными материалами для одежды в жаркие дни, но эти традиционные ткани интенсивно поглощают инфракрасное излучение, что ограничивает передачу тепла от тела человека в окружающую среду и снижает тепловой комфорт [22]. Электромагнитные волны теплового излучения испускаются всеми объектами при температуре выше абсолютного нуля из-за движения частиц и квазичастиц [23].

Будучи таким же излучателем тепла, человеческое тело генерирует излучение среднего ИК диапазона [24]. Доказано, что тепловое излучение составляет около 50% потерь тепла человеческим телом [25]. В основе новых терморегулирующих тканей лежат два подхода – управление скоростью рассеивания тепла от изделия и уровнем излучательной способности внешней поверхности тканей. Для этой цели наносят на текстильный материал полимерные покрытия. За счет увеличения излучательной способности поверхности покрытий можно достичь охлаждающего эффекта, поскольку нанесенное покрытие усиливает радиационное рассеивание тепла с поверхности изделия. Напротив, снижение коэффициента излучения приводит к нагреванию тканей. Эти механизмы использованы исследователями для производства тканей с эффектом пассивного охлаждения и нагрева. ИК-пики некоторых синтетических полимеров не перекрываются ИК-излучением, испускаемым телом человека. К числу таких полимеров относится полиэтилен, который может выступать перспективным компонентом современного охлаждающего текстиля (рис. 2) [26].

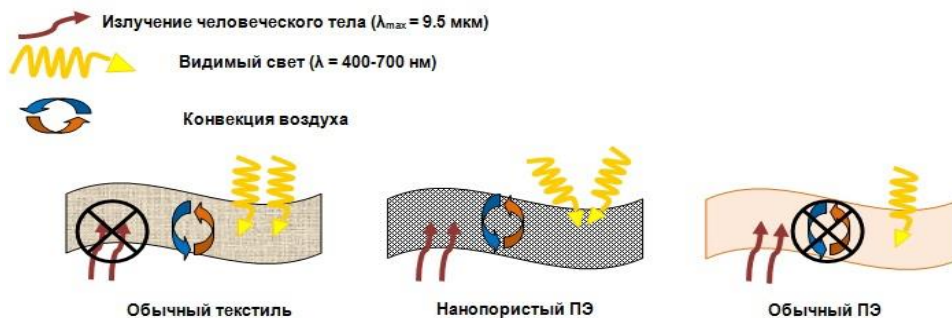


Рис. 2

Текстильные материалы из нанопористого полиэтилена характеризуются воздухопроницаемостью, непрозрачностью для видимого света и высоким коэффициентом пропускания ИК-излучения. Материалы способны пропускать до 90% человеческого тепла. Применение одежды из нанопористого полиэтилена обеспечивает повышение теплового комфорта пользователей

без использования систем кондиционирования воздуха [27]. С целью придания подобным изделиям привычной формы и обеспечения более комфортного процесса их эксплуатации в [28] предложено создание дублированного материала методом заключения волокон хлопка между двумя слоями нанопористого полиэтилена путем их точечного «сплавления». При этом боль-

шую роль в процессе ИК-пропускания играет размер и форма пор полимера. Наличие пор в диапазоне 50...1000 нм в структуре полиэтилена делает полиэтиленовые пленки непрозрачными для видимого света из-за эффекта рассеяния. При увеличении размера пор с 200 нм до 4,8 мкм эффект ИК-рассеяния пор усиливается. При размере пор 1,2 мкм коэффициент пропускания ИК-излучения тела начинает снижаться и достигает нижнего предела при размере пор 2,4 мкм.

Современные текстильные изделия непрозрачны в инфракрасном диапазоне длин волн, что препятствует эффективной передаче теплового излучения от человеческого тела при повышении температуры. В [29] разработан новый подход к персональному охлаждению с использованием «инфракрасно-прозрачных» текстильных материалов на основе полиамидных волокон и их смесей с хлопком, а также с применением мембраны из нанопористого полиэтилена для увеличения ИК-проницаемости.

При создании тканей с терморегулирующей функцией часто применяется принцип защиты кожи человека от внешнего ИК-воздействия. С этой целью на текстильные материалы наносят покрытия на основе оксидов металлов. Для формирования таких покрытий используют оксиды металлов, такие как  $TiO_2$ ,  $ZnO$  и  $CeO_2$ , которые являются хорошо известными пигментами. Доказаны их свойства обеспечивать прохладу в составе керамической черепицы и металлических кровельных листов [30].

Текстильные материалы с включением оксидов металлов способны защитить рабочих, которые занимаются строительством зданий и подвержены сильному воздействию солнечного света в таких странах, как Индия, и регионах Персидского залива. Подобные модификаторы способны проявлять также антимикробную и противогрибковую активность [31]. Поэтому перечисленные оксиды, нанесенные на текстильные материалы, способствуют поддержанию естественной температуры тела и ингибируют жизнедеятельность бактерий. Поскольку обычные белые пигменты отражают >80% падающего солнечного излучения, они признаны идеальными активными

компонентами пигментов для создания охлаждающих покрытий на текстиле.  $ZnO$  – известный пигмент, который широко используется в составе красок для строительных материалов, в основном для металлических или полимерных кровельных поверхностей. Оксид цинка представляет собой некоррозионный материал, нетоксичный при проглатывании и вдыхании, известный своей способностью поглощать УФ-излучения, гидрофобными свойствами и высокой отражательной способностью в ближнем инфракрасном диапазоне [32, 33].

К перспективным отражающим модификаторам относятся другие оксиды металлов, такие как диоксид титана и оксид меди [34]. При этом предпочтения при формировании покрытий отдаются частицам нанометрового размера. Размер частиц и их форма также влияют на свойства полученных материалов. Покрытия, содержащие чешуйчатые наночастицы оксида меди, обладают более высоким спектральным коэффициентом отражения и лучшими охлаждающими характеристиками по сравнению с покрытиями, содержащими сферические и стержневые наночастицы  $CuO$  [35].

Одной из инноваций в области разработки терморегулирующего текстиля является введение фотонных наноструктур (кристаллов) в текстильные изделия. С этой целью в [36] предложены фотонные ткани для индивидуальной терморегуляции (рис. 3). Фотонные кристаллы способны предотвращать выход теплового потока при блокировке некоторого спектра частот инфракрасного диапазона. Тепло при этом генерируется за счет отражения излучения человеческого тела. Действие фотонных кристаллов как теплоизоляторов напрямую зависит от их показателей преломления.

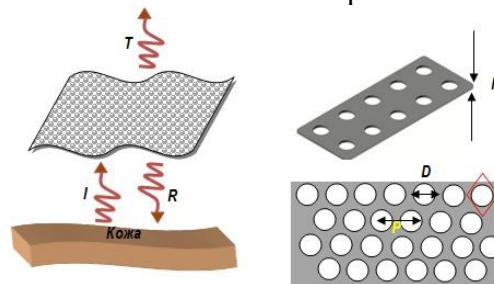


Рис.3

### *Использование веществ с фазовым переходом*

Наиболее эффективным подходом в создании тканей с терморегулирующей способностью является использование веществ, обладающих фазовым переходом (phase change materials – вещества с фазовым переходом / ВФП). Принцип фазового перехода заключается в том, что вещество способно переходить из одного физического состояния в другое, то есть из твердого состояния в жидкость и наоборот [37]. Фазовый переход происходит в определенном диапазоне температур. Вещество поглощает энергию в процессе нагрева при фазовом переходе, затем эта энергия может быть передана в окружающую среду в области фазового перехода при обратном процессе охлаждения [38]. Главным преимуществом данных материалов являются малые температурные интервалы перехода и способность аккумулирования большого количества энергии [39].

Нанесение веществ с фазовым переходом (ВФП) на текстильную основу позволяет добиться проявления нескольких эффектов [40]:

- охлаждающий эффект, вызванный поглощением тепла ВФП;
- эффект нагрева, вызванный тепловым излучением ВФП;
- терморегулирующий эффект, возникающий в результате поглощения или теплоотдачи ВФП, который используется для поддержания постоянной температуры;
- эффект активного теплового барьера, возникающий либо в результате поглощения тепла, либо в результате теплоотдачи ВФП, который регулирует, например, тепловой поток от тела человека в окружающую среду и адаптирует его к тепловым условиям (т. е. уровню активности человека, окружающей температуре).

Для придания терморегулирующих свойств текстильным материалам используют различные вещества с фазовым переходом. Спектр таких веществ довольно широк и включает в себя представителей различных классов веществ, а именно: масла [41], органические [42, 43], неорганические и жирные кислоты [43], гидратированные

соли [44], парафины [45, 46]. Перечисленные химические соединения под действием температуры переходят в жидкую фазу, в процессе чего возможен нежелательный расход активного агента. Для решения данной проблемы предложен способ микрокапсулирования, который широко применяется также в фармацевтической и пищевой промышленности.

Микрокапсулирование стало одним из наиболее эффективных способов придания текстилю терморегулирующей способности. Получение этого эффекта достигается путем заключения активного вещества – ВФП – в оболочку, таким образом формируются микрокапсулы. Кроме того, возможно и получение микрокапсул – частиц меньших размеров [47].

Активные вещества, выступающие ядром микрокапсул, реагируют на изменение температуры. При высокой температуре они переходят из твердого состояния в жидкое, накапливая при этом тепло и проявляя охлаждающий эффект, а при низкой – возвращаются в твердое, сопровождая этот процесс выделением тепла. Это позволяет управлять теплообменом между телом человека и окружающей средой, обеспечивая комфортные условия [48].

Для получения микрокапсул, способных накапливать тепловую энергию, в качестве активного агента применяют чаще всего углеводороды (парафины) с длинной цепочкой, жирные кислоты, масла растительной и животной природы, металлы, гидраты солей металлов и др. Особое место в процессе получения микрокапсул для придания терморегулирующих свойств текстильным материалам нашло рапсовое масло, активно используемое в осуществлении других видов специальной отделки текстильных материалов. Рапсовое масло растительного происхождения состоит главным образом из триглицеридов – сложных полных эфиров глицерина и различных жирных кислот. Терморегулирующие свойства этого масла во многом зависят от его состава и содержания жирных кислот, особенно насыщенных и ненасыщенных одноосновных кислот с неразветвленной углеродной цепью [40, 41].

Жирные кислоты также нашли применение в микрокапсулировании. Для этих веществ характерны высокая термостабильность и низкая летучесть, что предотвращает их преждевременное разрушение в капсулах и обеспечивает сохранение свойств при стирке или глажении текстильного материала. Большинство кислот также являются биоразлагаемыми, что делает их использование экологически безопасным для окружающей среды и организма человека. Однако при использовании жирных кислот в микрокапсулировании возникают следующие ограничения. Во-первых, возможно появление коррозии на оборудовании. Во-вторых, некоторые кислоты могут выделять токсичные пары при очень высоких температурах [42].

В микрокапсулировании представляет интерес возможность использования ряда термоаккумулирующих металлов в микрокапсулах для придания текстильным материалам терморегулирующих свойств. Для них характерна более высокая плотность, стабильность и устойчивость к разрушению структуры [31]. Кроме того, некоторым металлам и гидратам солей присущи высокая скрытая теплота на единицу объема и высокая теплопроводность, значительно отличающие их от органических материалов. Эти материалы доступны и имеют низкую стоимость по сравнению с органическими веществами. Однако главным их недостатком является склонность к неконгруэнтному плавлению, которое приводит к разрушению прежней структуры. В связи с этим разработаны микрокапсулы на основе додекагидрата натрия фосфата, оболочки которых формировались методом межфазной полимеризации с использованием хлороформа в качестве растворителя и ацетат-бутирата целлюлозы, сшитого метилendiизоцианатом. Теплоаккумулирующая способность синтезированных микрокапсул достаточно высока (поглощение  $140,4 \text{ кДж/кг}^{-1}$  при  $37^\circ\text{C}$ ) [44].

Наиболее технологически выгодными для получения терморегулирующих текстильных материалов являются парафиновые воски, углеводороды с линейной цепью, так как они обладают высокой способ-

ностью аккумулировать тепло, а температуры их фазового перехода попадают в пределы температур человеческого тела, при этом перечисленные препараты не являются токсичными [45]. Парафины обладают рядом преимуществ, за счет которых их использование в микрокапсулировании становится все актуальнее. К таким преимуществам относятся: большая теплота фазового перехода, низкий коэффициент вязкости, отсутствие склонности к смешиванию с полярными жидкостями, по сравнению с кристаллогидратами имеют меньшую удельную теплоту плавления [46]. Парафины химически инертны, обладают высокой коррозионной устойчивостью, легко выдерживают повторяющиеся циклы изменения агрегатного состояния, сохраняя свою стабильность после нагревания даже до  $250^\circ\text{C}$ . Вещество остается структурно стабильным, не снижая своей способности накапливать тепловую энергию в течение нескольких тысяч циклов [50].

Технология микрокапсулирования позволяет получать капсулы на основе предложенных веществ с фазовым переходом, заключая их в прочные оболочки, которые предотвращают нерациональный расход активного вещества. Таким образом, встает вопрос о закреплении микрокапсул на текстильном материале. В настоящее время предлагаются различные способы иммобилизации микрокапсул на текстильный материал: нанесением микрокапсул на поверхность текстильного материала путем пропитки и печати или посредством внедрения в волокнообразующий полимер на стадии электропрядения. Распространен способ распыления аэрозоля с капсулами с последующей сушкой [51, 52].

Использование микрокапсул для придания терморегулирующих свойств текстильным изделиям позволяет создавать комфорт в различных климатических условиях, поддерживая оптимальную температуру для организма человека. Данная технология применена в создании широкого спектра текстильных изделий с терморегулирующими свойствами: термобелье, одежде специального назначения, костюмах для Арк-

тики, обуви, медицинском текстиле для достижения определенных терапевтических или лечебных эффектов, в производстве изделий для активного отдыха, например палаток, а также материалов для мебели, постельном белье [53].

Микрокапсулирование обеспечивает лучшее решение проблемы создания текстильных материалов с терморегулирующими свойствами и обладает рядом преимуществ по сравнению с другими технологиями: экологической безопасностью, так как основу микрокапсул составляют вещества природного происхождения или используемые в пищевых и медицинских разработках, устойчивостью к различного рода химико-физическим воздействиям, долговечностью проявления терморегулирующего эффекта [53].

## ВЫВОДЫ

Разработка современных текстильных материалов, обладающих терморегулирующей способностью, является одной из актуальных задач прикладной науки. Использование тканей из природных материалов не может в должной степени обеспечить надежную и эффективную защиту человека от постоянно меняющихся температурных условий окружающей среды. В работе описана лишь малая часть существующих технологий придания материалам терморегулирующих свойств. Среди них особое место занимают технологии, направленные на создание ИК-пропускающих и ИК-отражающих материалов и пленок. Однако их получение является трудоемким и энергозатратным процессом. Внедрение специальных электронных систем в текстильные изделия также достаточно сложно и зависит от постоянного использования источников электроэнергии. При этом эффективность описанных методов не вызывает сомнений.

Наибольшее распространение получили технологии, в основе которых лежит применение веществ с фазовым переходом. ВФП используют как в чистом виде, так и в составе микрокапсул. Метод микрокапсулирования позволяет защитить активное ве-

щество микрокапсулы от воздействия окружающей среды, что особенно важно для веществ с фазовым переходом. Капсулирование ВФП значительно повышает срок эксплуатации терморегулирующего текстильного материала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Wild J.P. The textile archaeology of Romanburials: eyeswideshut // Dressing the Dead in Classical Antiquity. Gloucestershire: Amberley. 2012. P. 17...25.
2. Киселев А.М., Румянцев Е.В., Одинцова О.И., Румянцева В.Е. Современные технологии получения текстильных материалов со специальными свойствами и области их применения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2 (398). С. 121...133.
3. Кудряшова Т.А., Виноградова Т.А., Козьякова Н.Н. Сравнительный анализ результатов переработки льнотресты сортов льна-долгунца отечественной и иностранной селекции по основным хозяйственно-ценным признакам // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 2 (392). С. 61...67.
4. Шустов Ю.С., Плеханова С.В. Ассортимент и классификация нетканых мембранных материалов, применяемых в строительстве // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 3 (405). С. 104...107.
5. Sagar C., Vijay P., Piyush G., Vijaykumar C. Mechanical Properties of Natural Fibers // Journal of Natural Fibers. – 2022, V. 19. N 10. P. 3942...3953.
6. Erdogan U.H., Seki Y., Selli F. Wool fibres Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation // Wood head Publishing Series in Textiles – 2020, С. 257...278.
7. Пожидаева Д.А. Виды шерсти, классификация войлочных материалов в легкой промышленности // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых. 2022. С. 536...537.
8. Кузьмина Н.С., Конопальцева Н.М. Анализ современного состояния ассортимента материалов для спортивной одежды // Проблемы сервиса. 2008. С. 52.
9. Shuo S., Shuo S., Yifan S., Yanting H. et al. Recent Progress in Protective Membranes Fabricated via Electrospinning: Advanced Materials, Biomimetic Structures, and Functional Applications // Advanced materials. 2022. V. 34. N 17. P. 2107938
10. Демидова Н.С., Дворников М.В., Несынова А.С. Мембранная технология в многослойной конструкции терморегулирующей одежды для экстремальных условий // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16, № 3. С. 1...3.
11. Zhang P., Ren G., Tia L., Li B. et al. Environmentally friendly waterproof and breathable nanofiber membranes with thermal regulation performance by one-step electrospinning // Fibers and Polymers. 2022, V. 23. N 8. P. 2139...2148.

12. *Sakthivel S. et al.* Studies on influence of bonding methods on sound absorption characteristic of polyester/cotton recycled nonwoven fabrics // *Applied Acoustics*. 2021. V. 174. P. 107749.
13. *Rafikov A., Mirzayev N., Alimkhonova S.* Structure and Properties of Layered Material Based On Non-Woven Sheep's Wool // *J Textile Eng&Fash Tech* 3 (1): 18. 2021, V. 22. P. 3...8.
14. *Шустов Ю.С., Курденкова А.В., Буланов Я.И., Орлов А.В.* Сравнительная оценка дублированных нетканых материалов // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2023. № 5 (407). С. 56...61.
15. *Roh J.S., Kim S.* All-fabric intelligent temperature regulation system for smart clothing applications // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2016. V. 27. N 9. P. 1165...1175.
16. *Huang J. Li Y., Xu Z., Li W., Xu B., Meng H. et al.* An integrated smart heating control system based on sandwich structural textiles // *Nanotechnology*. 2019. V. 30. N 32. P. 325203.
17. *Habibi P., Moradi G., Moradi A., Golbabaie F. et al.* A review on advanced functional photonic fabric for enhanced thermoregulating performance // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2021. V. 16. P. 100504.
18. *Song Y.N., Lei M.Q., Deng L.F., Lei J., Li Z.M. et al.* Hybrid metamaterial textiles for passive personal cooling indoors and outdoors // *ACS Applied Polymer Materials*. 2020, V. 2. N11. C. 4379...4386.
19. *Zhou Y., Lou L., Fan J. et al.* Quantitative Comparison of Personal Cooling Garments in Performance and Design: A Review // *Processes*. 2023, V. 11. N10. C. 2976.
20. *Del Ferraro S., Falcone T., Morabito M., Messeri A. et al.* Cooling garments against environmental heat conditions in occupational fields: measurements of the effect of a ventilation jacket on the total thermal insulation // *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2021, V. 86. P. 103230.
21. *Özkan E., Kaplangiray B., Şekir U., Şahin Ş. et al.* Effect of different garments on thermophysiological and psychological comfort properties of athletes in a wear trial test // *Scientific Reports*. 2023. V. 13. N 1. P. 14883.
22. *Song Y. N., Li Y., Yan D.X., Lei J., Li Z.M. et al.* Novel passive cooling composite textile for both outdoor and indoor personal thermal management // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020. V. 130. P. 105738.
23. *Li W., Fan S.* Nanophotonic control of thermal radiation for energy applications // *Opt. Express*. 2018. V. 26. P. 15995...16021.
24. *Zhao B., Hu M., Ao X., Chen N., Pei G. et al.* Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects // *Appl. Energy*. 2019. V. 236. P. 489...513.
25. *Hsu P.C., Song A.Y., Catrysse P.B., Liu C. et al.* Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile // *Science*. 2016. V. 353. N6303. P. 1019...1023.
26. *Assaf S., Boutghatin M., Pennec Y., Thomy V., Korovin A. et al.* Polymer photonic crystal membrane for thermo-regulating textile // *Scientific reports*. 2020. V. 10. N 1. P. 9855.
27. *Hsu P.C., Liu C., Song A.Y., Zhang Z., Peng Y., et al.* A dual-mode textile for human body radiative heating and cooling // *Science advances*. 2017. V. 3. N 11. P. 700895.
28. *Wang T., Wu X., Zhu Q., Chen Y., Zhang S. et al.* A scalable and durable polydimethylsiloxane-coated nanoporous polyethylene textile for daytime radiative cooling // *Nanophotonics*. 2024, V. 13. N 5. P. 601...609.
29. *Zhu F.L., Feng Q.Q.* Recent advances in textile materials for personal radiative thermal management in indoor and outdoor environments // *International Journal of Thermal Sciences*. 2021, V. 165. P. 106899.
30. *Mermer E., Ünal R.* Passive thermal control systems in spacecrafts // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023, V. 45. N 3. P. 160.
31. *Dutta T., Khan A.A., Baildya N., Mondal P. et al.* Preparation of ZnO/chitosan nanocomposite and its applications to durable antibacterial, UV-blocking, and textile properties // *Biodegradable and Environmental Applications of Bionanocomposites*. Cham: Springer International Publishing. 2022. P. 169...187.
32. *Sanoopa C.P., John N., Chitra K. C.* Sublethal hepatotoxic effects and biotransformation response in the freshwater fish, *Oreochromis mossambicus* exposed to silicon dioxide nanoparticles // *Biologia*. 2022. V. 77. N 9. P. 2507...2518.
33. *Zhang M., Zhou T., Li H. et al.* UV-durable superhydrophobic ZnO/SiO<sub>2</sub> nanorod arrays on an aluminum substrate using catalyst-free chemical vapor deposition and their corrosion performance // *Applied Surface Science*. 2023. V. 623. P. 157085.
34. *You Z., Zhang M., Wang J. et al.* Experimental study of optical and cooling performances of CuO and TiO<sub>2</sub> near-infrared reflective blending coatings // *Solar Energy*. 2021. V. 225. P. 19...32.
35. *You Z., Zhang M. et al.* A black near-infrared reflective coating based on nano-technology // *Energy and Buildings*. 2019. V. 205. P. 109523.
36. *Zhao Y., Fitzgerald M.L., Tao Y., Pan Z. et al.* Electrical and thermal transport through silver nanowires and their contacts: effects of elastic stiffening // *Nano Letters*. 2020. V. 20. N. 10. P. 7389...7396.
37. *Ramlow H., Andrade K.L., Immich A. P. S.* Smart textiles: An overview of recent progress on chromic textiles // *The journal of the textile institute*. 2021. V. 112. N 1. P. 152...171.
38. *Rahman M.S., Alom J., Nitai A.S. et al.* Ultraviolet-blocking protective textiles // *Protective Textiles from Natural Resources*. Woodhead Publishing. 2022, P. 395...444.
39. *Prajapati D.G., Kandasubramanian B.* A review on polymeric-based phase change material for thermo-regulating fabric application // *Polymer Reviews*. 2020, V. 60. N. 3. P. 389...419.

40. Мифтахова Л.Х. Получение фазовых диаграмм и расчет критических параметров бинарной смеси «Этанол-триглицерид рапсового масла» в программе VMGSim // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 11. С. 69...72.

41. Mohammed N. K., Tan C.P., Manap Y.A. et al. Spray drying for the encapsulation of oils. A review // *Molecules*. 2020, V. 25. N. 17. P. 3873.

42. Sierra V., Chejne F. Energy saving evaluation of microencapsulated phase change materials embedded in building systems // *Journal of Energy Storage*. 2022. V. 49. P. 104102.

43. Abu-Hijleh B., Jaheen N. Energy and economic impact of the new Dubai municipality green building regulations and potential upgrades of the regulations // *Energy Strategy Reviews*. 2019. V. 24. P. 51...67.

44. Yu K., Liu Y., Yang Y. Review on form-stable inorganic hydrated salt phase change materials: Preparation, characterization and effect on the thermophysical properties // *Applied Energy*. 2021. V. 292. P. 116845.

45. Das S., Huq I.U., Ahamed S. et al. An Overview on Multifunctional Smart Textiles and Future Perspective for Mankind Development with Nano-technology // *International Journal of Research*. 2020. V. 4. P. 12.

46. Белохвостов А.А., Аришанский Е.Я., Борисевич И.С. Важнейшие классы неорганических соединений: адаптивный курс. Витебск: ВГУ им. П.М. Машерова, 2020. С. 98.

47. Липина А.А., Одинцова О.И., Антонова А.С., Носкова Ю.В. Оценка нанодисперсного состояния и агрегативной устойчивости экспериментальных образцов инкапсулированных акарицидно-репеллентных веществ // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2019. № 5. С. 130...135.

48. Dutta M. M., Goswami M. Coating Materials: Nano-Materials // *Advanced Surface Coating Techniques for Modern Industrial Applications* // IGI Global. 2021. P. 1...30.

49. Noohi Z., Nosouhian S., Niroumand B. et al. Use of low melting point metals and alloys ( $T_m < 420^\circ\text{C}$ ) as phase change materials: a review // *Metals*. 2022. V. 12. N6. P. 945.

50. Zhou Y., Wu S., Ma Y., Zhang H. et al. Recent advances in organic/composite phase change materials for energy storage // *ES Energy & Environment*. 2020. V. 9. N 12. P. 28...40.

51. Левицкая О.Р. Исследование результатов нанесения микрокапсулированных веществ с изменяемым фазовым состоянием на текстильный материал // *Физика волоконистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2017)*. Иваново: ИВГПУ, 2017. P. 262...266.

52. Пирогов Д.А., Маслов Л.Б., Тимофеев И.А., Полянничко Е.А. Моделирование фаз строения объемной тканой структуры и их влияние на упругие свойства композиционного материала на ее основе // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2022. № 5 (401). С. 223...228.

53. Kazaz S., Miray R., Lepiniec L. et al. Plant monounsaturated fatty acids: Diversity, biosynthesis, functions and uses // *Progress in lipid research*. 2022. V. 85. P. 101138.

## REFERENCES

1. Wild J.P. The textile archaeology of Roman burials: eyeswideshut // *Dressing the Dead in Classical Antiquity*. Gloucestershire: Amberley. 2012, P. 17...25.

2. Kiselev A.M., Rummyantsev E.V., Odintsova O.I., Rummyantseva V.E. Modern technologies for obtaining textile materials with special properties and their fields of application // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022. No. 2 (398). S. 121...133.

3. Kudryashova T.A., Vinogradova T.A., Koz'yakova N.N. Comparative analysis of results of processing of flax varieties of long-term flax of domestic and foreign selection by main economic and valuable characteristics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2021. No. 2 (392). S. 61...67.

4. Shustov Yu.S., Plekhanova S.V. Assortment and classification of non-woven membrane materials used in construction // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2023. No. 3 (405). S. 104...107.

5. Sagar C., Vijay P., Piyush G., Vijaykumar C. Mechanical Properties of Natural Fibers // *Journal of Natural Fibers*. 2022, V. 19. No. 10. P. 3942...3953.

6. Erdogan U.H, Seki Y., Selli F. Wool fibres Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation // *Wood head Publishing Series in Textiles-2020*, P. 257...278.

7. Pozhidaeva D.A. Types of wool, classification of felt materials in light industry // *Innovatsionnyy potential razvitiya obshchestva: vzglyad molodykh uchenykh*. 2022. P. 536...537.

8. Kuzmina N.S., Konopaltseva N.M. Analysis of the current state of the range of materials for sportswear // *Problemy servisa*. 2008, P. 52.

9. Shuo S., Shuo S., Yifan S., Yanting H. et al. Recent Progress in Protective Membranes Fabricated via Electrospinning: Advanced Materials, Biomimetic Structures, and Functional Applications // *Advanced materials*. 2022, V. 34. N 17. P. 2107938.

10. Demidova N.S., Dvornikov M.V., Nesynova A.S. Membrane technology in the multilayer design of thermoregulating clothing for extreme conditions // *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2009, V. 16. N3. P. 1...3.

11. Zhang P., Ren G., Tia L., Li B. et al. Environmentally friendly waterproof and breathable nanofiber membranes with thermal regulation performance by one-step electrospinning // *Fibers and Polymers*. 2022, V. 23. N 8. P. 2139...2148.

12. Sakhivel S. et al. Studies on influence of bonding methods on sound absorption characteristic of polyester/cotton recycled nonwoven fabrics // *Applied Acoustics*. 2021, V. 174. P. 107749.

13. Rafikov A., Mirzayev N., Alimkhonova S. Structure and Properties of Layered Material Based On Non-Woven Sheep's Wool // *J Textile Eng&Fash Tech* 3 (1): 18. 2021, V. 22. P. 3...8.
14. Shustov Yu.S., Kurdenkova A.V., Bulanov Ya.I., Orlov A.V. Comparative evaluation of duplicated nonwoven materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2023. No. 5 (407). S. 56...61.
15. Roh J.S., Kim S. All-fabric intelligent temperature regulation system for smart clothing applications // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2016, V. 27. N 9. P. 1165...1175.
16. Huang J. Li Y., Xu Z., Li W., Xu B., Meng H. et al. An integrated smart heating control system based on sandwich structural textiles // *Nanotechnology*. 2019, V. 30. N 32. P. 325203.
17. Habibi P., Moradi G., Moradi A., Golbabaie F. et al. A review on advanced functional photonic fabric for enhanced thermoregulating performance // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2021, V. 16. P. 100504.
18. Song Y.N., Lei M.Q., Deng L.F., Lei J., Li Z.M. et al. Hybrid metamaterial textiles for passive personal cooling indoors and outdoors // *ACS Applied Polymer Materials*. 2020, V. 2. N 11. C. 4379...4386.
19. Zhou Y., Lou L., Fan J. et al. Quantitative Comparison of Personal Cooling Garments in Performance and Design: A Review // *Processes*. 2023, V. 11. N 10. C. 2976.
20. Del Ferraro S., Falcone T., Morabito M., Messeri A. et al. Cooling garments against environmental heat conditions in occupational fields: measurements of the effect of a ventilation jacket on the total thermal insulation // *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2021, V. 86. P. 103230.
21. Özkan E., Kaplangiray B., Şekir U., Şahin Ş. et al. Effect of different garments on thermophysiological and psychological comfort properties of athletes in a wear trial test // *Scientific Reports*. 2023, V. 13. N 1. P. 14883.
22. Song Y. N., Li Y., Yan D. X., Lei J., Li Z. M. et al. Novel passive cooling composite textile for both outdoor and indoor personal thermal management // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020, V. 130. P. 105738.
23. Li W., Fan S. Nanophotonic control of thermal radiation for energy applications // *Opt. Express*. 2018, V. 26. P. 15995...16021.
24. Zhao B., Hu M., Ao X., Chen N., Pei G. et al. Radiative cooling: A review of fundamentals, materials, applications, and prospects // *Appl. Energy*. 2019, V. 236. P. 489...513.
25. Hsu P.C., Song A.Y., Catrysse P.B., Liu C. et al. Radiative human body cooling by nanoporous polyethylene textile // *Science*. 2016, V. 353. N 6303. P. 1019...1023.
26. Assaf S., Boutghatin M., Pennec Y., Thomy V., Korovin A. et al. Polymer photonic crystal membrane for thermo-regulating textile // *Scientific reports*. 2020, V. 10. N 1. P. 9855.
27. Hsu P.C., Liu C., Song A.Y., Zhang Z., Peng Y., et al. A dual-mode textile for human body radiative heating and cooling // *Science advances*. 2017, V. 3. N 11. P. 700895.
28. Wang T., Wu X., Zhu Q., Chen Y., Zhang S. et al. A scalable and durable polydimethylsiloxane-coated nanoporous polyethylene textile for daytime radiative cooling // *Nanophotonics*. 2024, V. 13. N 5. P. 601...609.
29. Zhu F.L., Feng Q.Q. Recent advances in textile materials for personal radiative thermal management in indoor and outdoor environments // *International Journal of Thermal Sciences*. 2021, V. 165. P. 106899.
30. Mermer E., Ünal R. Passive thermal control systems in spacecrafts // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023, V. 45. N 3. P. 160.
31. Dutta T., Khan A.A., Baildya N., Mondal P. et al. Preparation of ZnO/chitosan nanocomposite and its applications to durable antibacterial, UV-blocking, and textile properties // *Biodegradable and Environmental Applications of Bionanocomposites*. Cham: Springer International Publishing. 2022, P. 169...187.
32. Sanoopa C.P., John N., Chitra K. C. Sublethal hepatotoxic effects and biotransformation response in the freshwater fish, *Oreochromis mossambicus* exposed to silicon dioxide nanoparticles // *Biologia*. 2022, V. 77. N 9. P. 2507...2518.
33. Zhang M., Zhou T., Li H. et al. UV-durable superhydrophobic ZnO/SiO<sub>2</sub> nanorod arrays on an aluminum substrate using catalyst-free chemical vapor deposition and their corrosion performance // *Applied Surface Science*. 2023, V. 623. P. 157085.
34. You Z., Zhang M., Wang J. et al. Experimental study of optical and cooling performances of CuO and TiO<sub>2</sub> near-infrared reflective blending coatings // *Solar Energy*. 2021, V. 225. P. 19...32.
35. You Z., Zhang M. et al. A black near-infrared reflective coating based on nano-technology // *Energy and Buildings*. 2019, V. 205. P. 109523.
36. Zhao Y., Fitzgerald M.L., Tao Y., Pan Z. et al. Electrical and thermal transport through silver nanowires and their contacts: effects of elastic stiffening // *Nano Letters*. 2020, V. 20. N. 10. P. 7389...7396.
37. Ramlow H., Andrade K. L., Immich A. P. S. Smart textiles: An overview of recent progress on chromic textiles // *The journal of the textile institute*. 2021, V. 112. N 1. P. 152...171.
38. Rahman M.S., Alom J., Nitai A.S. et al. Ultraviolet-blocking protective textiles // *Protective Textiles from Natural Resources*. Woodhead Publishing. 2022, P. 395...444.
39. Prajapati D.G., Kandasubramanian B. A review on polymeric-based phase change material for thermo-regulating fabric application // *Polymer Reviews*. 2020, V. 60. N. 3. P. 389...419.
40. Miftakhova L.H. Obtaining phase diagrams and calculating critical parameters of the binary mixture "Ethanol-triglyceride of rapeseed oil" in the VMGSim program // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2015. V. 18. No. 11. S. 69...72.

41. Mohammed N. K., Tan C.P., Manap Y.A. et al. Spray drying for the encapsulation of oils. A review // *Molecules*. 2020, V. 25. N. 17. P. 3873.
42. Sierra V., Chejne F. Energy saving evaluation of microencapsulated phase change materials embedded in building systems // *Journal of Energy Storage*. 2022, V. 49. P. 104102.
43. Abu-Hijleh, B., Jaheen N. Energy and economic impact of the new Dubai municipality green building regulations and potential upgrades of the regulations // *Energy Strategy Reviews*. 2019, V. 24. P. 51...67.
44. Yu K., Liu Y., Yang Y. Review on form-stable inorganic hydrated salt phase change materials: Preparation, characterization and effect on the thermophysical properties // *Applied Energy*. 2021, V. 292. P. 116845.
45. Das S., Huq I.U., Ahamed S. et al. An Overview on Multifunctional Smart Textiles and Future Perspective for Mankind Development with Nano-technology // *International Journal of Research*. 2020, V. 4. P. 12.
46. Belokhvostov A.A., Arshansky E.Ya., Borisevich I.S. The most important classes of inorganic compounds: adaptive course. Vitebsk: VGU imeni P.M. Masherova, 2020. P. 98.
47. Lipina A.A., Odintsova O.I., Antonova A.S., Noskova Yu.V. The evaluation of nanodispersed state and aggregative stability of encapsulated experimental samples acaricid-repellent substances // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2019. No. 5. S. 130...135.
48. Dutta M.M., Goswami M. Coating Materials: Nano-Materials // *Advanced Surface Coating Techniques for Modern Industrial Applications* // IGI Global. 2021, P. 1...30.
49. S, Niroumand B. et al. Use of low melting point metals and alloys ( $T_m < 420^\circ \text{C}$ ) as phase change materials: a review // *Metals*. 2022, V. 12. N 6. P. 945.
50. Zhou Y., Wu S., Ma Y., Zhang H. et al. Recent advances in organic/composite phase change materials for energy storage // *ES Energy & Environment*. 2020, V. 9. N 12. P. 28...40.
51. Levshitskaya O.R. A study of the results of applying microencapsulated substances with phase change on the textile material // *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoymkiye tekhnologii i materialy (SMARTEX-2017)*. Ivanovo: IVGPU, 2017. N 1. P. 262...266.
52. Pirogov D.A., Maslov L.B., Timofeev I.A. et al. Simulation of the structure phases of a volume woven structure and their influence on the elastic properties of the composite material based on // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022, N 5 (401). P. 223...228
53. Kazaz S., Miray R., Lepiniec L. et al. Plant monounsaturated fatty acids: Diversity, biosynthesis, functions and uses // *Progress in lipid research*. 2022, V. 85. P. 101138.

Рекомендована кафедрой химической технологии волокнистых материалов ИГХТУ. Поступила 06.06.24.