

ОБЗОРЫ

УДК 691

СОВРЕМЕННЫЕ ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ**Колосова А.С., Пикалов Е.С.***ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru*

Древесное сырье и в первую очередь древесина относятся к натуральным материалам, которые на протяжении всей истории человеческого общества и на сегодняшний день широко применяются в различных областях. Это связано с широкой распространенностью древесного сырья, его экологичностью, легкостью, средними значениями прочности и химической стойкости, высокими эстетическими показателями. Несколько ограничивают использование древесного сырья высокие значения водопоглощения и гигроскопичности, низкая водостойкость и горючесть. В данной работе рассмотрены традиционные и перспективные теплоизоляционные материалы, получаемые на основе древесного сырья в виде побочных продуктов лесозаготовки, лесопиления и деревообработки. Представлены классификация, общая характеристика, преимущества, недостатки и области применения материалов и изделий на основе различных видов измельченной древесины и древесной коры с использованием неорганических и органических связующих. Отдельно рассмотрены возможности по получению утеплителей при использовании в качестве связующего лигноуглеводного комплекса древесного сырья, при получении наноцеллюлозы из древесноволокнистой массы, а также при использовании сучьев, ветвей и другого древесного сырья. Данная работа позволяет оценить разнообразие и эффективность применения теплоизоляционных материалов на основе древесного сырья, преимущества и недостатки их применения в строительстве.

Ключевые слова: теплоизоляционные материалы, измельченная древесина, древесные плиты, органобетоны, древесная кора, пробковый агломерат, наноцеллюлоза

**MODERN EFFECTIVE THERMAL INSULATION MATERIALS
BASED ON WOOD RESOURCES****Kolosova A.S., Pikalov E.S.***Vladimir State University of a name of Alexander Grigorevich and Nikolay Grigorevich Stoletovs,
Vladimir, e-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru*

Wood raw materials and primarily wood are natural materials that have been widely used in various fields throughout the history of human society and today. This is due to the wide prevalence of wood raw materials, its environmental friendliness, lightness, average values of strength and chemical resistance, and high aesthetic indicators. The use of wood raw materials is somewhat limited by high values of water absorption and hygroscopicity, low water resistance and flammability. In this paper, traditional and promising thermal insulation materials obtained on the basis of wood raw materials in the form of by-products of logging, sawmilling and woodworking are considered. The classification, general characteristics, advantages, disadvantages and applications of materials and products based on various types of crushed wood and wood bark using inorganic and organic binders are presented. Separately, the possibilities for obtaining insulation materials when using a lignin-carbohydrate complex of wood raw resources as a binder, when obtaining nanocellulose from a wood-fiber mass, as well as when using boughs, branches and other wood raw materials are considered. This paper allows us to evaluate the variety and effectiveness of the use of thermal insulation materials based on wood raw materials, the advantages and disadvantages of their use in construction.

Keywords: heat insulating materials, crushed wood, wood-based boards, organic-filled concrete, tree bark, cork agglomerate, nanocellulose

Древесное сырье является разновидностью растительного сырья и представляет собой предназначенные для переработки или использования в качестве топлива материалы, получаемые из древесных (деревянистых) растений, к которым относятся деревья, кустарники и многолетние растения с образующими древесину стволом, ветвями и корневой системой. К древесному сырью относятся поваленные деревья, стволы поваленных деревьев, отделенные от корневой части и очищенные от сучьев (древесные хлысты), полу-

чаемые из них различные виды круглых, колотых, пиленых и др. лесоматериалов (бревна, доски, шпон и т.п.), древесное топливо, а также древесные отходы в виде пне-корневой древесины, вершин, обломков стволов, коры, одревесневших боковых побегов, отходящих от ствола (сучья), и малоодревесневших боковых побегов, отходящих от ствола и сучьев (ветви), листьяев, хвои, крупнокусковых отходов (горбыль, рейки, короткомер и др.) и измельченной древесины (опилки, стружка и др.). Вторичным древесным сырьем являются

отходы потребления изделий из древесины и измельченные древесные отходы.

Древесное сырье, в первую очередь древесина, широко применяется в самых разных отраслях человеческой деятельности: для производства строительных изделий, ступеней, опалубки, строительных лесов, деталей интерьера, столярно-мебельных изделий, домашней утвари, для получения целлюлозы, картона, бумаги, этилового спирта и др. материалов, используется в качестве топлива, мульчирующего материала, сорбента и т.д.

За счет волокнисто-пористой структуры древесина отличается низкими значениями теплопроводности и звукопроводности, однако при этом для данного материала характерны высокие показатели водопоглощения и гигроскопичности, что наряду со сравнительно высокой стоимостью ограничивает применение данного материала в качестве теплоизоляции. Поэтому в чистом виде натуральная древесина за счет средних значений прочности, химической стойкости и высоких эстетических свойств в большинстве случаев применяется в качестве энергоэффективных конструкционных, облицовочных и отделочных материалов и изделий, обеспечивая дополнительную теплоизоляцию различных конструкций [1, 2]. В то же время измельченная древесина и другие древесные отходы, составляющие до 37% от объемов лесозаготовки и до 52% от объемов лесопиления и деревообработки [3, 4], обладают текстурой, структурой и свойствами, схожими с первичной деловой древесиной.

Цель данной работы заключается в характеристике современных теплоизоляционных материалов на основе древесного сырья в виде измельченной древесины и древесных отходов, в рассмотрении их особенностей, преимуществ и недостатков.

Измельченная древесина в качестве теплоизоляции

Измельченная древесина является основной разновидностью древесных отходов и образуется в результате лесозаготовки, лесопиления и деревообработки, при очистке строительных площадок от деревьев и кустарников, при санитарной рубке в процессе ухода за зелеными насаждениями, а также в результате измельчения крупнокусковых древесных отходов, пнекорневой древесины и т.д. В зависимости от способа измельчения и размера образующихся частиц различают следующие виды измельченной древесины:

– древесная дробленка, образующаяся при измельчении древесины на рубильных

машинах, дробилках, молотковых мельницах в виде частиц длиной от 2 до 20 мм;

– щепы, образующаяся при рубке и колке древесины и представляющая собой частицы толщиной более 1 мм. Если частицы имеют определенный размер, однородны по длине и ширине, а количество примесей в них не превышает допустимых значений, то щепа называется технологической, а если древесные частицы содержат примеси коры, хвои и листьев, то щепа называется зеленой (образуется при измельчении тонкомерных деревьев, сучьев, ветвей и лесосечных отходов). В случае применения щепы для сжигания в энергетических целях она называется топливной;

– древесная стружка, образующаяся при резании (фрезеровании, строгании) древесины и представляющая собой частицы толщиной не более 1 мм и длиной более 5 мм. Частицы толщиной до 0,25 мм и длиной 6–8 мм относятся к микростружке. Однородную по размерам, чистоте среза и углу перерезания волокон стружку с допустимым количеством примесей и соответствующую требованиям по размерам называют технологической;

– древесные опилки, образующиеся при пилении древесины и представляющие собой частицы толщиной до 1 мм и длиной менее 5 мм. Длинные и тонкие частицы, получаемые при пилении древесины на специальных станках, называют технологическими опилками;

– древесная пыль, образующаяся при шлифовании и другой механической обработке древесины и представляющая собой несORTированные частицы размером менее 1 мм. Древесная пыль заданного гранулометрического состава, получаемая при сухом размоле древесины, называется древесной мукой.

К материалам, получаемым в результате переработки древесины, в том числе кусковых древесных отходов, путем измельчения, относятся:

– древесная шерсть (упаковочная стружка), получаемая на специальных строгальных станках и представляющая собой частицы толщиной 0,3–0,5 мм и длиной 200–530 мм. В чистом виде древесная шерсть для теплоизоляции не применяется, а используется в качестве наполнителя для получения органических композиционных утеплителей;

– древесные волокна (древесная целлюлоза), получаемые путем разделения измельченной и пропаренной технологической щепы на отдельные волокна на специальных мельницах (дефибраторы, рефинеры) с последующей сушкой древес-

новолокнистой массы, называемой древесной ватой и являющейся разновидностью эковаты (древесная эковата). Древесные волокна являются разновидностью целлюлозных волокон, представляют собой длинные одревесневшие клетки с толстыми стенками и составляют основу древесины.

Наиболее простым способом применения измельченной древесины в виде щепы, стружки и опилок является их использование в качестве насыпной строительной теплоизоляции при частном и индивидуальном строительстве, в основном для горизонтальных поверхностей (полы, межэтажные перекрытия, чердаки). Применение насыпной теплоизоляции из измельченной древесины позволяет создать максимально ровный слой утеплителя с теплопроводностью 0,06–0,095 Вт/(м·°С). Для эффективного применения измельченной древесины необходимо применение антипиренов и антисептиков (возможно перемешивание с гашеной известью, золой или шлаками в количестве 5–10%, также используют медный купорос CuSO_4 , буру или борную кислоту), устройство паро- и гидроизоляции, выполнение верхнего слоя из более мелкой фракции, уплотнение слоя утеплителя. Предпочтительно применение измельченных опилок через несколько месяцев после образования, так как в данном случае в них содержится меньше влаги. Возможно применение измельченной древесины с другими видами насыпной теплоизоляции (вспученные перлит и вермикулит, керамзит и др.), которые будут выполнять роль дренажа, препятствуя намоканию и гниению древесины. Древесную вату, в которую также добавляют антипирены и антисептики, применяют в качестве задувной (надувной) теплоизоляции с использованием специального компрессорного оборудования. Основными преимуществами насыпной теплоизоляции из измельченной древесины являются легкость и низкая стоимость, а к недостаткам, кроме общих для древесины недостатков, относятся слеживание и уплотнение слоя утеплителя со временем (возможно периодическое добавление новых порций материала), невозможность применения в контакте с сильно нагревающимися поверхностями и влажной атмосферой, высокая вероятность поселения грызунов и насекомых. Кроме того, насыпная теплоизоляция может применяться только внутри объема, ограниченного другими строительными конструкциями.

Чтобы исключить усадку частиц измельченной древесины, уменьшить водопоглощение, придать прочность и жесткость слою теплоизоляции, применяют различ-

ные связующие. Материал связующего и его количество определяют структуру и основные свойства получаемого теплоизоляционного композита, однако стоит учитывать, что теплопроводность и плотность композита выше, чем у насыпной теплоизоляции. Для всех композитов с древесным наполнителем характерно снижение прочности и теплопроводности, повышение водопоглощения с увеличением размера частиц наполнителя, уменьшение шероховатости поверхности материала и повышение пластичности сырьевой смеси с уменьшением размера частиц наполнителя.

Измельченная древесина на неорганических связующих

Одним из наиболее часто применяемых неорганических связующих для измельченной древесины является цемент марок М300–М500. Небольшое количество цемента (около 6–10%) добавляют в состав для насыпной теплоизоляции, чтобы уменьшить усадку слоя, особенно при теплоизоляции вертикальных поверхностей. В этом случае измельченную древесину перемешивают с небольшим количеством воды, в которую добавляют антисептики и антипирены, и укладывают во влажном виде с возможностью испарения воды в течение двух-трех недель. При использовании около 15–20% цемента получают так называемую теплую штукатурку для внутреннего утепления стен и потолков, заделки щелей и трещин. Для получения теплой штукатурки измельченную древесину в сырьевом составе частично заменяют на измельченные картон и бумагу (около 30% смеси), а цемент может частично заменяться на известковое вяжущее. При увеличении количества цемента и добавлении песка можно получить теплую стяжку пола, укладываемую для утепления между основанием и чистовым покрытием. Теплая стяжка состоит из нижнего слоя, в котором к измельченной древесине добавляют около 10% цемента, около 20% песка и антисептик, и верхнего слоя, в котором количество цемента и песка повышают примерно в два раза.

При добавлении цемента в количестве, сравнимом с количеством измельченной древесины ($\approx 45\text{--}55\%$), получают легкие бетоны, которые объединяют под названием органобетоны и в зависимости от вида заполнителя подразделяют на щепобетоны, опилкобетоны и стружкобетоны. В ряде случаев органобетоны также объединяют под терминами «арболит», «древобетон» или «деревобетон», однако, по мнению авторов данной работы, правильной при-

менять эти термины только к щепобетону на основе щепы преимущественно хвойных пород деревьев. Отчасти такое сходство в наименовании видов органобетонов можно объяснить тем, что для заполнения цемента могут применяться смеси из щепы, опилок и стружки, допускается некоторое количество коры и хвои. Для повышения эксплуатационных характеристик в состав органобетонов могут дополнительно вводиться песок, мелкозернистый гравий, зола и керамзит, а цемент для снижения стоимости может частично заменяться глиной или известью. Для повышения биостойкости и прочности измельченной древесины, снижения ее водопоглощения проводят минерализацию древесного заполнителя при помощи сульфата алюминия, известкового молочка (слабый водный раствор $\text{Ca}(\text{OH})_2$) или жидкого стекла (водный раствор силикатов натрия и (или) калия). Минерализация измельченной древесины позволяет выровнять кислотно-щелочной баланс цементного теста и нейтрализовать содержащиеся в древесине сахара, которые образуют с бетонной смесью так называемые «цементные яды», т.е. вещества, замедляющие схватывание бетона. Стоит отметить, что в щепе хвойных пород сахар содержится меньше, поэтому для их нейтрализации требуется меньше минерализатора и такая щепка чаще используется в производстве арболита, а дубовые опилки обладают наименьшим водопоглощением. Измельченная древесина хвойных пород и дуба также содержит в своем составе природные антисептические вещества.

Разновидностью органобетонов является фибролит (также известен под торговыми названиями зидарит, траулит, гераклит, селенит), в котором содержится около 40% цементного вяжущего, а в качестве заполнителя применяется древесная шерсть. Органобетон, содержащий 10–30% древесных волокон, является целлюлозным фиброцементом, который также известен под торговыми названиями минерит и сембрит (кимбрит). Разновидностью опилкобетона является термoporит, который состоит из цемента, опилок размером 5–10 мм (допускается до 30% опилок крупнее 10 мм), извести, хлорной извести $3\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{Cl}_2$ и жидкого стекла. Опилкобетон, получаемый из смеси влажных опилок и цемента с гашеной известью или суглинком, называется термиз, а при дополнительном введении диатомита, трепела или золы теплоэлектростанций его называют термизолом (термозолом). Опилкобетон на основе смеси цемента и гипса называется ксилобетон, а на основе смеси цемента и из-

весткового теста с добавлением 5%-ного раствора поваренной соли – ксилоизол.

Органобетоны обладают средними для бетонов значениями прочности на сжатие, морозостойкости и плотности, высокими показателями прочности на изгиб, трещиностойкости, воздухо- и паропрооницаемости, хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами, высокой гвездимостью и легкостью механической обработки. Органобетоны являются экологически безопасными и относятся к трудногорючим материалам, однако у них сравнительно высокие значения водопоглощения и усадки, сравнительно низкие показатели по водостойкости и точности геометрии. Органобетоны применяются для получения монолитных конструкций по заливочной технологии, а также для производства блоков (наиболее распространены древоблоки из арболита), панелей и плит (наиболее распространены цементно-стружечные плиты ЦСП и фиброцементные или цементно-волокнистые плиты ЦВП), которые в зависимости от соотношения сырьевых компонентов применяются как энергоэффективные конструкционные, теплоизоляционно-конструкционные или теплоизоляционные материалы и изделия в малоэтажном строительстве. Широко распространены пустотные стеновые блоки, которые по своему составу являются вариациями арболита и известны под торговыми названиями бризолит, дюрисол, теколит и др., являются блоками несъемной опалубки и в готовой конструкции выполняют роль теплоизоляции. После сборки стен пустоты в этих блоках заполняют цементом, выполняющим роль несущего каркаса стены, а часть пустот в таких блоках может быть заполнена вкладышами из пенополистирола. В качестве несъемной опалубки также применяются щепоцементные плиты под торговым названием велокс. Фибролит, термoporит и ксилобетон применяют для производства плит в каркасном строительстве, а термиз, термизол и ксилоизол – для производства теплоизоляционных плит и получения монолитной теплоизоляции. Целлюлозный фиброцемент применяется для производства энергоэффективных фасадных панелей, внутренней отделки и устройства перегородок, а минерит за счет высокой термостойкости и огнестойкости дополнительно применяют в качестве огнестойких перегородок и экранов.

При использовании глины в качестве связующего для измельченной древесины возможно получение насыпной теплоизоляции для пола с использованием около 10% глины и стен с использованием около 20%

глины, теплой штукатурки с добавлением около 50% глины и глиняно-древесных (глиняно-щепочных, глиняно-стружечных и глиняно-опилочных) композиций, называемых глинокомпозициями и глинобетонами, с добавлением 50–80% глины для производства заливочных композиций, блоков и плит (также называются блок-панелями, матами и блок-матами). В составы с использованием глиняного связующего также добавляют антисептики, в основном борную кислоту. Высыхание глины в смесях с измельченной древесиной происходит естественным путем без контакта с солнечными лучами для снижения трещинообразования. К преимуществам теплоизоляции на глиняном связующем относятся высокая экологичность, сравнительно высокая прочность на сжатие, средняя огнестойкость, возможность неоднократного затворения водой, доступность сырьевой базы и низкая стоимость. К недостаткам данных материалов относятся сравнительно высокая теплопроводность, низкая водостойкость, высокое водопоглощение, сравнительно невысокая биостойкость. Для эффективного использования материалов с глиняным связующим необходимы гидро- и пароизоляция, точное соблюдение пропорций компонентов и воды для обеспечения хорошей адгезии к утепляемой поверхности.

Существуют разработки по получению теплоизоляционного материала, называемого термопластом и представляющего собой наполненную древесными опилками (около 50% состава) глино-смоляную пасту с влажностью около 26–27%. Глино-смоляная паста примерно на 80% состоит из глины, лесса или суглинка и примерно на 20% из каменноугольной, древесной или торфяной смолы, креозотового или каменноугольного масла. Данный термопласт применяется для монолитной строительной теплоизоляции [5]. Существует разновидность данного материала, состоящая из 15–25% опилок, 25–40% каменноугольной смолы и 15–20% воды. Такой термопласт применяется для устройства кровли промышленных зданий и сооружений, для утепления фундаментов домов и коттеджей [6].

Достаточно широко в качестве связующего для измельченной древесины применяются гипсовые вяжущие. Для получаемых композиций характерно малое время схватывания, которое осложняет их укладку и нанесение, поэтому в них добавляют замедлители, например казеиновый клей, активизированный известью или каустической содой NaOH. Гипсо-опилочные и гипсо-стружечные композиции с добав-

лением 10–30% гипса применяют в качестве теплых штукатурок и мастик, а также в производстве теплоизоляционных блоков и плит. В составе блоков и плит содержание гипса может достигать 83%, однако при этом теплопроводность повышается до 0,209–0,247 Вт/(м·°C), и такие изделия применяются как конструкционно-теплоизоляционные для малонагруженных строительных конструкций. Разновидностями материалов, содержащих 80–85% гипса, являются гипсоволокнистые листы и плиты (ГВЛ и ГВП), в которых наполнителем является древесное волокно или разволокненная макулатура. ГВП и ГВЛ наравне с гипсокартонными листами ГКЛ, состоящими из двух листов картона и слоя гипса между ними, применяются как теплоизоляционно-отделочные ($\lambda = 0,22–0,36$ Вт/(м·°C) для ГВЛ и ГВП, $\lambda = 0,21–0,34$ Вт/(м·°C) для ГКЛ), а за счет добавок в гипс могут быть водостойкими и огнестойкими. Материалы на гипсовых связующих отличаются малой плотностью, относительно высокими теплоизоляционными свойствами, сравнительно невысокой прочностью, высоким водопоглощением, низкой водостойкостью и используются только для внутренних работ и для эксплуатации в сухих условиях, для них обязательны наружная отделка или облицовка. Разновидностью данной группы материалов является таумалит, который получают на основе гипсового вяжущего с незначительным количеством цемента и адеструктивной пасты с добавлением опилок или древесной шерсти и применяют в качестве конструкционно-теплоизоляционного материала [1, 7]. Таумалит отличается сравнимой с органобетонами прочностью, а за счет перехода до 80% сульфата кальция, составляющего основу гипса, в нерастворимое и неразлагающееся в естественных условиях соединение (гидросульфоканкарбосиликат кальция, или таумасит) он отличается сравнительно высокой водостойкостью [7].

Другой широко применяемой для измельченной древесины группой связующих являются магнезиальные вяжущие (магнезиальный цемент, цемент Сореля), которые представляют собой тонкоизмельченные каустический магнезит MgO или каустический доломит $MgO \cdot CaCO_3$, затворяемые на водном растворе хлористого магния (обычно в виде минерала бишофита $MgCl_2 \cdot 6H_2O$). Хлористый магний может быть заменен на сульфат магния или сульфат железа. Композиционные материалы на основе магнезиальных вяжущих объединяют под названием магнолит, а материалы с наполнителем в виде измельченной древеси-

ны называют ксилолит. Разновидностью ксилолита с высоким содержанием бишофита является бишолит, а ксилолит с наполнителем в виде древесной шерсти называют магнезиальным фибролитом. Для повышения прочности и стойкости к истиранию в состав для получения ксилолита добавляют мелкозернистый песок, для снижения теплопроводности в состав добавляют трепел, а для повышения водостойкости в состав добавляют тальк или сульфат железа, поверхность ксилолита пропитывают гидрофобными масляными составами и натирают мастиками. Прочность и водостойкость изделий из ксилолита также могут быть увеличены в результате твердения при повышенных температурах. Ксилолит отличается сравнительно высокой прочностью, стойкостью к ударным нагрузкам, биостойкостью, средними звуко- и теплоизоляционными свойствами, хорошей адгезией состава. Недостатками ксилолита являются невысокие значения водостойкости и химической стойкости, сравнительно высокая плотность. Ксилолит применяют для получения теплых полов по заливочной технологии, производства плит, плиток, листов, блоков, лестничных ступеней, подоконников и др. Изделия из ксилолита являются энергоэффективными конструкционными и отделочными, а плиты на основе каустического доломита применяют в качестве теплоизоляционных [8].

В качестве неорганического связующего для теплоизоляционных материалов на основе измельченной древесины также могут применяться известь и известковые вяжущие, представляющие собой продукт обжига известняка с активными добавками в виде шлака, золы или глины. Достаточно широко распространены составы, в которых в качестве связующего применяется смесь извести с цементом или гипсом. При использовании смеси извести с гипсом получаемый материал называют в большинстве случаев ксилобетоном, хотя, по мнению авторов данной статьи, более правильным будет называть его ксилосиликатом. Данные материалы применяются преимущественно для получения теплых штукатурок. По прочности и водостойкости данная группа материалов занимает промежуточное положение между материалами, получаемыми с использованием цемента и гипса. Преимуществами данных материалов являются высокие антисептические свойства и хорошая адгезия состава.

Еще одним неорганическим связующим является силикатная паста, состоящая из жидкого стекла с добавлением тонкомолотых известняка или песка для ускоре-

ния схватывания и повышения прочности, а также кремнефтористого натрия для придания антисептических свойств. Силикатная паста характеризуется хорошей адгезией к древесине и на ее твердение не влияют сахара, содержащиеся в древесине. Стекло-древесная масса, получаемая из данного связующего и измельченной древесины, отличается биостойкостью, огнестойкостью и средней прочностью при средних значениях водопоглощения и водостойкости. Стекло-древесная масса применяется для изготовления теплоизоляционных плит и среднего слоя перегородочных и стеновых панелей, наружный слой которых выполняют из древесноволокнистых плит и каркасной деревянной обвязки торцевых сторон. Наружные стороны стеклодревесных панелей покрывают силикатной пастой с повышенным содержанием песка. Стеклодревесные панели применяются при каркасном строительстве, а теплоизоляционные стекло-древесные плиты применяют для утепления чердачных перекрытий [9].

Измельченная древесина на органических связующих

Наиболее распространенными органическими связующими для измельченной древесины являются термореактивные синтетические смолы (реактопласты) [10, 11]: карбамидоформальдегидные, фенолоформальдегидные, меламиноформальдегидные, фурановые и изоцианатные. На основе синтетических смол при дополнительном введении гидрофобизаторов, антисептиков и антипиренов получают древесные плиты, которые называют по типу древесного наполнителя. Наиболее распространенными являются древесностружечные (ДСтП) и древесноволокнистые (ДВП) плиты, а к менее распространенным относятся волокнистостружечные (ДСтП с наружными слоями из древесного волокна), древесноопилочные (ДОП, плиты на основе опилок и 4–8% синтетических смол называют тырсолитом [5]), древеснощепочные и древесношерстные плиты (ДШП). Широко распространенными на сегодняшний день также являются ориентированно-стружечные плиты (ОСП или OSB – Oriented Strand Board) из древесной шерсти, в которых стружка наружных слоев расположена продольно, а стружка внутренних слоев – поперечно длине. ДВП на основе синтетических смол в зависимости от плотности подразделяют на полутвердые и их аналог MDF (Medium Density Fibreboard, МДФ или среднеплотная ДВП), твердые и их аналог HDF (High Density Fibreboard, ХДФ или высокоплотная ДВП) и сверхтвердые.

К мягким ДВП на синтетическом связующем относятся, например, плиты с торговыми названиями GUTEX и Steiko сухого способа производства, получаемые в результате орошения полиуретановой смолой (4% от состава плиты) с последующей обработкой смесью пара и горячего воздуха для отверждения смолы. По своей структуре древесные плиты могут быть сплошными и пустотелыми (многупустотными, т.е. содержать внутри пустоты и каналы), а также однослойными, трехслойными и многослойными, в которых слои могут отличаться как по размеру древесных частиц, так и по их ориентации, плотности слоя и количеству связующего. Наружные (лицевые) слои плит обычно делают из более мелкой фракции, они могут обладать повышенной плотностью и увеличенным количеством связующего. Для защиты древесных плит от внешних воздействий, понижения водопоглощения и придания им более эстетичного вида их в ряде случаев шпонируют, ламинируют, лакируют или окрашивают. Твердые ДВП с декоративным лицевым слоем называют оргалит.

Древесные плиты на синтетических связующих характеризуются средними показателями по прочности и ударной вязкости, относительной легкостью механической обработки, хорошими звуко- и теплоизоляционными свойствами, средними среди органических теплоизоляционных материалов значениями водопоглощения и биостойкости, гигроскопичностью, горючестью, способностью к тлению и наличием токсичных соединений в составе связующих. С уменьшением размеров древесных частиц, увеличением количества связующего и давления прессования плит повышаются их прочность и твердость, уменьшается водопоглощение, но ухудшаются теплоизоляционные характеристики. Древесные плиты малой плотности применяются в качестве теплоизоляционных, плиты средней плотности в качестве теплоизоляционно-отделочных, а плиты высокой плотности – в качестве отделочных и конструктивных материалов в строительстве и при производстве мебели. Кроме того, древесные плиты, преимущественно ОСП, применяются в качестве наружных слоев в производстве SIP-панелей (Structural Insulated Panel – конструкционно-изоляционная панель), в которых внутренний слой выполняется из теплоизоляционного материала (пенополистирол, пенополиизоцианурат, пенофенопласт или базальтовая вата) и которые применяются в каркасно-панельном малоэтажном строительстве для получения ограждающих конструкций.

Сходными с древесными плитами по составу являются теплоизоляционные и конструкционно-теплоизоляционные полимербетоны, в которых связующим являются эпоксидные, фурановые, карбамидоформальдегидные фенолформальдегидные или полиэфирные смолы в количестве до 10%, в качестве наполнителя применяется измельченная древесина в количестве до 85% и дополнительно содержатся пигменты, пластификаторы, модификаторы и отвердители в количестве до 5%. Эти материалы в зависимости от количества наполнителя отличаются сравнительно высокой прочностью, морозостойкостью, абразивостойкостью и химической стойкостью при низких значениях теплопроводности и водопоглощения, а применяются для возведения и теплоизоляции внутренних ограждающих конструкций [1].

Насыпной теплоизоляцией на органическом связующем являются опилочные гранулы (опилочные окатыши), получаемые из смеси опилок, антипирена, антисептика и клея на основе карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ). В свою очередь КМЦ получают из хлопковой или древесной целлюлозы, целлюлозы из различных однолетних растений, т.е. из древесных и сельскохозяйственных растительных отходов, а также из целлюлозосодержащих отходов: гидролизной целлюлозы, отходов вискозных нитей и отходов производства щелочной целлюлозы [12]. Опилочные гранулы отличаются низкой теплопроводностью (0,076 Вт/м·°С), легкостью, не являются средой обитания для мышей и насекомых, не дают усадки и обладают пониженной по сравнению с измельченной древесиной горючестью.

В качестве органического связующего для измельченной древесины в индивидуальном и частном строительстве применяют универсальный или строительный поливинилацетатный клей в количестве 10–50%. В ряде случаев в такую смесь для повышения прочности добавляют цемент в количестве 10% от массы клея. Полученный теплоизоляционный материал применяется для заполнения различных пустот с целью утепления, характеризуется паропропускаемостью, относительными жесткостью и прочностью.

Существуют разработки по получению композиционного материала, в котором наполнителем являются древесные частицы размером не более 2 мм, а в качестве связующего применяется полистирол. Особенностью данной сырьевой смеси является возможность применения мягких сортов древесины и получение полистирола

путем растворения отходов на основе пенополистирола в метилхлориде с последующей термообработкой для удаления растворителя, который затем конденсируется и используется повторно. Разработанный материал может применяться в производстве теплоизоляционно-отделочных плит, по плотности и прочности он соответствует полутвердым ДВП, отличается средним водопоглощением и теплопроводностью $0,073 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ [13, 14].

На основе мелкоизмельченной древесины и древесной муки с использованием термопластичных связующих (полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, акрилонитрилбутадиенстирол и полиамиды) и добавлением различных модифицирующих добавок могут быть получены древесно-полимерные композиты (ДПК, жидкое дерево, древопласт, экологически чистые древесно-наполненные пластмассы или ЭДНП и др.), которые за счет высокой пластичности смеси могут перерабатываться в изделия различной конфигурации методами прессования, экструзии и литья под давлением [15]. Данные материалы отличаются высокой степенью наполнения (50–85%), поэтому по своим свойствам и внешнему виду во многом аналогичны древесине. ДПК характеризуются легкостью, водостойкостью, атмосферостойкостью, биостойкостью, низким водопоглощением, легкостью механической обработки, сравнительно высокой прочностью и хорошими теплоизоляционными свойствами. Данные материалы в настоящее время широко используются в производстве корпусной мебели, дверных и оконных блоков, подоконников, террасных досок и сайдинга, однако существуют исследования и разработки по возможности их применения для теплоизоляции [16, 17].

Теплоизоляция на основе древесной коры

Древесная кора представляет собой наружный покров ствола, сучьев и ветвей одревесневших (древесных) растений, состоит из внутреннего слоя живых клеток (луба) и внешнего слоя отмерших клеток (пробки). Пробка образуется в результате опробкования клеток луба под действием жироподобного вещества суберина (глицерид феллоновой кислоты), делающего оболочки клеток непроницаемыми для воды и газа. Кора в отличие от древесины содержит меньше волокон, что объясняет ее меньшую прочность, но тонкостенные клетки пробки заполнены воздухом, поэтому кора обладает высокими теплоизоляционными свойствами [18]. Кора является отходом операции окорки при лесозаготовке и лесопилении, поэтому отличается низкой сто-

имостью. Для обозначения разных по размерам фракций коры используют термины, аналогичные применяемым для измельченной древесины: дробленка коры, щепа коры, стружка коры и т.д.

После высушивания кора может применяться в качестве засыпной теплоизоляции [18, 19] или в качестве наполнителя для композиционных материалов на различных связующих, от которых зависит название получаемого композита. При использовании гипса и быстротвердеющего цемента получают королиты, при использовании обычных цементов – коробетоны, а при использовании синтетических термоактивных смол – коропласты и древесно-корьевые плиты (ДКП). Есть исследования по получению ДКП на термопластичных связующих, например с использованием вторичного полиэтилена [18] или с применением водного экстракта из коры в качестве связующего [20]. В ряде случаев ДКП причисляют к королитовым плитам, однако, по мнению авторов данной статьи, термин «коропласт» лучше отражает их состав. По своим свойствам материалы с наполнителем в виде измельченной коры отличаются высокими звуко- и теплоизоляционными свойствами, однако у них меньше прочность и выше водопоглощение по сравнению с материалами, получаемыми с использованием измельченной древесины. Композиты на основе измельченной коры выпускаются в виде плит для строительной теплоизоляции, а в ряде случаев для внутренней отделки.

В особую группу выделяют утеплители на основе коры пробкового дуба. В качестве насыпной теплоизоляции применяют так называемые пробковые гранулы (крошка), получаемые в результате измельчения отходов от производства бутылочных пробок и пробковых утеплителей. Пробковый шпон применяется в качестве теплоизоляционно-отделочного материала для пола (пробковая доска, покрытая износостойким лаком) и стен (пробковые обои на бумажной или флизелиновой основе). Белый агломерат, называемый также чистым, представляет собой пробковые гранулы (в ряде источников указывается на использование молодой коры ветвей), из которых при низком содержании в них влаги с помощью прессования при добавлении связующих (органические клеи (преимущественно акриловые клеи на латексной основе), желатин, каменноугольный пек и смолы [21]) формируют теплоизоляционно-отделочные изделия для внутренних работ в виде рулонов и плит, которые также называют импрегнированными. В ряде источников ука-

зывается, что белый агломерат получают без добавления связующих, однако влажность при его производстве невысока и нагрев не производится, поэтому, по мнению авторов данной работы, образование естественного связующего, как в случае с черным агломератом, который будет рассмотрен далее, невозможно. В качестве теплых подложек под ламинат наряду с рулонным пробковым агломератом применяют пробковые гранулы на битумной основе и резиново-пробковую подложку. Пробковые гранулы также могут являться наполнителем для получения теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных полимербетонов или применяться для получения жидкого пробкового герметика, содержащего 87% пробковых гранул, 5% акрилового связующего и 8% воды.

Прочая теплоизоляция на древесной основе

Особой разновидностью утеплителей на древесной основе являются материалы, при получении которых не применяются дополнительные компоненты, а связующими становятся продукты деструкции и трансформации лигноуглеводного комплекса, включающего лигнин (трехмерный фенольный полимер) и гемицеллюлозу (полисахариды). При определенной влажности древесного сырья под действием температуры происходит размягчение лигнина и частичный гидролиз гемицеллюлозы с последующей поликонденсацией и образованием новых химических связей с получением высокомолекулярных лигноуглеводных комплексов, которые выступают связующим для целлюлозных волокон [22, 23]. Степень трансформации лигноуглеводного комплекса зависит от температуры, а степень уплотнения и прочность – от давления. Органические кислоты, образующиеся при гидролизе полисахаридов, и смоляные кислоты, присутствующие в древесине, служат катализаторами процессов поликонденсации [24]. Самыми распространенными материалами на лигноуглеводном связующем являются мягкие ДВП мокрого способа производства (МДВП, древесноволокнистые маты, в том числе плиты GUTEX и Steiko мокрого способа производства), которые получают на основе древесной ваты преимущественно хвойных пород деревьев, которые по сравнению с лиственными породами содержат больше лигнина, хотя возможно использование смеси из древесного волокна хвойных и лиственных пород. Для снижения водопоглощения в состав МДВП вводят парафин, для повышения жесткости и прочности добавляют латекс, а для получения плит большой толщины производят их

склеивание из отдельных слоев при помощи поливинилацетата. Формирование плит происходит в результате сушки так называемого ковра из тонкоразмолотой древесноволокнистой массы при температуре 130–160 °С. МДВП отличаются невысокой степенью трансформации лигноуглеводного комплекса, высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами, легкостью, экологичностью, эластичностью, высоким водопоглощением, низкими показателями водостойкости и прочности. К материалам на лигноуглеводных связующих также относятся лигноуглеводные древесные пластики (ЛУДП), получаемые при давлении 1,5–5 МПа и температуре 160–180 °С, и пьезотермопластики (ПТП), получаемые при давлении 20–30 МПа и температуре 140–225 °С. Возможно получение ПТП при предварительном гидролизе древесных частиц, что позволяет снизить давление до 15 МПа и уменьшить температуру до 160 °С. Предварительная обработка также может проводиться желатинированием хлором, аммиаком, серной кислотой и др. или химической поликонденсацией с участием фурфурола, фенола, формальдегида, ацетона, щелочного или гидролизного лигнина и др. [23]. В качестве альтернативного варианта активации составляющих лигноуглеводного комплекса древесины возможна его биодеструкция с использованием дегреворазрушающих грибов (ксилотрофов), которые вырабатывают гидролитические и окислительные ферменты [23–25]. ПТП за счет более высоких значений температуры и давления (термин «пьезотермопластик» происходит от греч. *piezō* – давить и *therme* – тепло) характеризуется более высокими значениями трансформации лигноуглеводного комплекса, более высокими значениями прочности и водостойкости, однако их производство отличается длительностью и высокой энергоемкостью. ЛУДП и ПТП могут применяться в качестве конструкционных, конструкционно-теплоизоляционных и теплоизоляционных изделий. К наиболее распространенным разновидностям ЛУДП и ПТП на древесной основе относятся плиты LDF (Low Density Fiberboard, ЛДФ или низкоплотная ДВП), получаемые из древесных волокон сосен и эвкалиптов при высоких температуре и давлении, и вибролит, получаемый при температуре до 200 °С и давлении до 1,96 МПа из смеси древесных частиц размером 0,5–2 мм и шлама на основе размолотой в вибромельнице древесины. Вибролитовые плиты после формования подвергают закалке при 120–160 °С для снижения водопоглощения и разбухания. Плиты LDF

и вибролит применяются в качестве конструкционно-отделочных и отделочно-теплоизоляционных. К ПТП также относится экспанзит, который получают из пробковой крошки с высокой влажностью в результате прессования при температуре 250–400 °С. Особенностями экспанзита является образование связующего на основе лигнина и суберина, а также увеличение материала в объеме до 30% во время нагревания при переработке в изделие за счет расширения водяных паров и воздуха. Экспанзит называют черным пробковым агломератом из-за черного цвета, получаемого в результате частичного обугливания пробковых гранул во время нагрева при производстве. Плиты из экспанзита применяются для строительной теплоизоляции, характеризуются высокими теплоизоляционными свойствами, легкостью, а также пониженными значениями водопоглощения, гигроскопичности и горючести.

Свежесрубленные ветви диаметром до 8 см можно применять в изготовлении сучкоблоков, для получения которых ветви спрессовывают, блок обвязывают в двух местах проволокой, неровности в виде боковых сучков спиливают, проводят антисептирование и естественную сушку. По своим свойствам сучкоблоки во многом схожи с изделиями из древесины, но отличаются меньшими значениями прочности и водостойкости, более высоким водопоглощением. Сучкоблоки применяются в качестве конструктивных и теплоизоляционных изделий в малоэтажном каркасном строительстве.

В качестве насыпной теплоизоляции в частном и индивидуальном строительстве также применяются высушенные хвоя ($\lambda = 0,08 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$) и листья ($\lambda = 0,05\text{--}0,06 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$).

К теплоизоляции на основе лигноцеллюлозы, в основном древесной целлюлозы, относится группа материалов, объединяемых под общим термином «наноцеллюлоза» [26]:

– нанокристаллическая целлюлоза, представляющая собой стержнеобразные нитевидные кристаллы диаметром 2–50 нм и длиной 50–1160 нм со степенью кристалличности 54–88%. Нанокристаллы целлюлозы выделяют в результате кислотного гидролиза аморфной составляющей целлюлозных волокон;

– нанофибриллированная целлюлоза, представляющая собой нановолокна диаметром 5–20 нм и длиной до нескольких мкм, которые проявляют свойства псевдопластичного геля. Нановолокна получают при высокой скорости измельчения

при больших температуре и давлении, при измельчении ультразвуком, кавитационно-гидродинамическим и др. методами;

– бактериальная наноцеллюлоза, получаемая в результате экстракции органическими растворителями из низкомолекулярных полисахаридов, которые образуются при ферментации исходной целлюлозы бактериями.

Путем химической сшивки из наноцеллюлозных материалов могут быть получены целлюлозные аэрогели и пены. Например, при обработке древесины концентрированной кислотой в присутствии поливинилового спирта и сшивающего агента (1,2,3,4-бутантетракарбоксылной кислоты) с последующей лиофилизацией (заморозка с последующей вакуумной возгонкой) может быть получена теплоизоляционная целлюлозная пена ($\lambda = 0,027 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$) с высокими значениями упругости и прочности [27]. Наноцеллюлозные материалы также могут применяться для получения полимерных композиционных материалов, в том числе покрытий. По сути, разновидностью наноцеллюлозы теплоизоляционного назначения является материал, названный разработчиками нанодревесиной и получаемый из заготовки с продольным расположением древесных волокон в три этапа: кипячением в смеси гидроксида и сульфата натрия, удалением лигнина и большей части гелицеллюлозы при помощи пероксида водорода с сохранением структуры расположения волокон и лиофилизации [28]. Волокна нанодревесины упаковываются глюкановыми цепями, удерживаются при помощи межмолекулярных водородных связей и ван-дер-ваальсовых сил. Полученный материал отличается высокой пористостью (около 91%), способностью отражать 95% лучистого теплового потока и анизотропностью свойств – поперек волокон прочность и теплоизоляционные свойства существенно выше, при этом тепло может распространяться по микропорам вдоль волокон при изоляции распространения в поперечном направлении, что исключает нагрев материала. Наноцеллюлозные материалы и изделия на их основе отличаются высокими значениями прочности, легкости, гибкости, теплоизоляционных свойств и способны к биодеградации, а их основными недостатками являются горючесть и в большинстве случаев сравнительно высокая стоимость, трудоемкость технологии получения. Наноцеллюлоза может использоваться в производстве изделий для строительной и трубной теплоизоляции.

Заключение

В настоящее время в строительной теплоизоляции утеплители на основе древесного сырья, включающие как традиционно используемые материалы, так и материалы из достаточно недавних разработок, являются одними из распространенных и наиболее широко применяются при строительстве малоэтажных зданий. Из-за горючести, низких значений водостойкости и биостойкости древесного сырья материалы на его основе применяются при введении антипиренов, гидрофобизаторов и антисептиков, уменьшающих данные недостатки. Однако перечисленные недостатки в сочетании с низкой термостойкостью препятствуют применению утеплителей на древесной основе для технической теплоизоляции при высоком нагреве теплоизолируемых поверхностей. Указанные недостатки могут быть уменьшены за счет применения неорганических и органических связующих, которые повышают прочность, снижают теплопроводность, изолируют частицы древесного сырья от контакта с влагой, агрессивными средами, атмосферными факторами, а также защищают их от воздействия биологического характера. В связи с этим композиционные материалы позволяют сочетать преимущества древесного наполнителя и применяемого связующего, однако стоит учитывать, что при высоком содержании связующего уменьшаются легкость и теплоизолирующие характеристики материала. Стоит учитывать, что в отличие от теплоизоляции на неорганической основе и газонаполненных полимерных материалов и изделий, рассмотренных авторами данной работы ранее [29, 30], утеплители на основе древесного сырья отличаются низкой стоимостью и экологической безопасностью, которым в последнее время уделяется большое внимание при выборе строительных материалов. В то же время древесное сырье является широко распространенным в природе и позволяет обеспечивать крупнотоннажное производство материалов на его основе. Таким образом, рассмотренные материалы на древесной основе являются группой перспективных утеплителей для строительной теплоизоляции, а их производство будет развиваться, расширяться и совершенствоваться, способствуя увеличению ассортимента эффективных строительных материалов.

Список литературы

1. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Современные энергоэффективные конструкционные и облицовочные строительные материалы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 7. С. 76–87.
2. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Характеристика современных материалов для облицовки фасадов и коколей зданий и сооружений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 4. С. 55–61.
3. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса как фактор устойчивого природопользования. Инженерный вестник Дона. 2015. № 2–2. С. 81.
4. Андреев А.А. Ресурсосбережение и использование отходов заготовки и переработки древесного сырья // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2014. № 10. С. 148–155.
5. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности: Учебно-справочное пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 268 с.
6. Попов В.Г., Попова А.В., Жигулина Т.Н., Кротов В.Н. Создание строительных материалов на основе отходов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2017. № 5–6. С. 35–38.
7. Грановский А.В., Джамуев Б.К., Лысков А.В., Попов М.В. Современные несущие конструкции зданий из быстротвердеющего композита (таумалита) на основе гипсоцементного вяжущего // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 9. С. 101–105.
8. Звездина Е.В., Трескова Н.В. Повышение водостойкости теплоизоляционных изделий на основе каустического доломита // Научно-практический интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование». 2011. № 1. С. 13. [Электронный ресурс]. URL: <http://nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2011/01/13.pdf> (дата обращения: 11.03.2021).
9. Коротаяев Э.И., Симонов В.И. Производство строительных материалов из древесных отходов. М.: Лесная промышленность, 1972. 144 с.
10. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С. Технологии производства, свойства и области применения композиций на основе фенолформальдегидных смол // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 96–114.
11. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5. С. 245–256.
12. Куничан В.А., Харитонов С.В. Синтез карбоксиметилцеллюлозы из льняной целлюлозы // Химия растительного сырья. 1999. № 2. С. 155–157.
13. Колосова А.С., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Теплоизоляционный композиционный материал на основе древесных и полимерных отходов // Экология и промышленность России. 2020. № 2. С. 28–33.
14. Колосова А.С., Пикалов Е.С., Селиванов О.Г. Применение древесных отходов для получения теплоизоляционного композиционного материала на основе вторичного полимерного связующего // Экология промышленного производства. 2020. № 2. С. 6–10.
15. Клесов А.А. Древесно-полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 756 с.
16. Воскобойников И.В., Кондратюк В.А., Щелков В.М., Константинова С.А., Поляков М.Н. Разработка базовых технологических процессов получения древесно-полимерных композиционных материалов // Вестник Московского государственного университета леса. – Лесной вестник. 2012. № 8. С. 146–153.
17. Стородубцева Т.Н., Аксомитный А.А., Кузнецов Д.С. Исследование теплофизических свойств древесного полимер-песчаного композиционного материала // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. № 7 (43). С. 142–145.
18. Пастори З., Горбачева Г.А., Санаев В.Г., Мохачине И.Р., Борчок З. Состояние и перспективы использования древесной коры // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2020. № 5. С. 74–88.

19. Пастори З., Мохачине И.Р., Горбачева Г.А., Санаев В.Г. Исследования теплоизолирующей способности древесной коры // Лесотехнический журнал. 2017. № 1. С. 157–161.
20. Андрейчук Т. Теплоизоляция. Ч. III // Ватерпас. 2001. № 1–2. С. 118–121.
21. Килошева Н.В., Данилов В.Е., Айзенштадт А.М. Теплоизоляционный материал из коры сосны и ее экстракта // Строительные материалы. 2016. № 11. С. 48–50.
22. Базарнова Н.Г., Галочкин А.И., Крестьянников В.С. Влияние гидротермической обработки древесины на свойства древесных прессованных материалов // Химия растительного сырья. 1997. № 1. С. 11–16.
23. Савиновских А.В. Получение пластиков из древесных и растительных отходов в закрытых пресс-формах: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2016. 107 с.
24. Шеина Т.В. Архитектурное материаловедение: учебное пособие. Ч. I. Самара: СамГТУ, 2011. 374 с.
25. Кондращенко В.И., Тарарушкин Е.В., Горшина Е.С., Кесарийский А.Г. Биопластики – древесные композиционные материалы, получаемые методами биотехнологии // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2012. № 1. С. 17–24.
26. Зарубина А.Н., Иванкин А.Н., Кулезнев А.С., Кочетков В.А. Целлюлоза и наноцеллюлоза. Обзор // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2019. № 5. С. 116–125.
27. Wang P., Aliheidari N., Zhang X., Ameli A. Strong ultralight foams based on nanocrystalline cellulose for high-performance insulation. Carbohydrate Polymers. 2019. Vol. 218. P. 103–111.
28. Li T., Song J., Zhao X., Yang Z., Pastel G., Xu S., Jia C., Dai J., Chen C., Gong A., Jiang F., Yao Y., Fan T., Yang B., Wågberg L., Yang R., Hu L. Anisotropic, lightweight, strong, and super thermally insulating nanowood with naturally aligned nanocellulose. Science Advances. 2018. Vol. 4. Iss. 3. Article 3724.
29. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные эффективные теплоизоляционные материалы на неорганической основе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 9. С. 64–75.
30. Колосова А.С., Пикалов Е.С. Современные газонаполненные полимерные материалы и изделия // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 10. С. 54–67.