



Сравнительная оценка эффективности мезопористых материалов различной химической природы для модификации поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов

Л.А. Абдрахманова¹, А.Г. Хантимиров¹, Р.К. Низамов^{1,2}, В.Г. Хозин¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,

²Академия наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Мезопористые материалы (с размером пор 2–50 нм), например, упорядоченные кремнеземы, алюмосиликаты, углеродные наноструктуры, в составе традиционных строительных материалов обеспечивают повышение физико-механических и других эксплуатационных свойств. Такие мезопористые материалы разной химической природы и морфологии частиц могут эффективно использоваться в композициях на основе поливинилхлорид - древесная мука. Данные модификаторы играют роль связующего агента в системе поливинилхлорид-древесная мука, обеспечивая усиление взаимодействия между основными компонентами композиции. При этом на свойства композитов оказывает влияние не только химическая природа частиц, а в большей степени пористость структуры, а именно истинная удельная поверхность частиц и степень их агрегированности. Целью работы является изучение морфологии и характера пористой структуры и оценка влияния этих параметров на структуру и свойства модифицированных древесно-полимерных композитов. Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: изучить основные параметры пористой структуры и морфологии поверхности мезопористых материалов, рассмотреть влияние мезопористых материалов различной химической природы на технологические и эксплуатационные свойства древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида.

Результаты. В работе представлены результаты определения удельной поверхности и пористой структуры двух типов мезопористых материалов из анализа изотерм адсорбции/десорбции азота при температуре кипения жидкого азота (77 К), полученных на анализаторе удельной поверхности и размеров пор «ТОР 200». Удельная площадь поверхности, рассчитанная в соответствии с теорией Брунауэра-Эммета-Теллера (BET), для углеродного материала оказалась более чем в 25 раз выше по сравнению с кремнеземистым пористым материалом. При этом объем пор выше в 10 раз, характеризуясь меньшими диаметрами пор. Сравнение условий переработки и показателей физико-механических и термостабильности композиций показало, что прочностные свойства и перерабатываемость расплава выше в присутствии кремнеземистого материала, а термостабильность – в присутствии углеродного мезопористого материала.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в возможности повышения эксплуатационных характеристик древесно-полимерных материалов и снижения энергозатрат на их производство экструзионным способом.

Ключевые слова: мезопористые материалы, поливинилхлорид, древесно-полимерный композит, пористость, удельная поверхность

Для цитирования: Абдрахманова Л.А., Хантимиров А.Г., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Сравнительная оценка эффективности мезопористых материалов различной химической природы для модификации поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов // Известия КГАСУ, 2026, № 2 (76), с. 8-22, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.1, EDN: BEEBSO

Comparative evaluation of the efficiency of mesoporous materials of different chemical nature for modification of polyvinyl chloride wood-polymer composites

L.A. Abdrakhmanova¹, A. G. Khantimirov¹, R.K. Nizamov^{1,2}, V.G. Khozin¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,

²Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* Mesoporous materials (with a pore size of 2–50 nm), such as ordered silicas, aluminosilicates, and carbon nanostructures, as part of traditional building materials, provide improved physical, mechanical, and other performance properties. Such mesoporous materials of varying chemical nature and particle morphology can be effectively used in PVC-wood flour composites. These modifiers act as a binding agent in the PVC-wood flour system, enhancing the interaction between the main components of the composite. The properties of the composites are influenced not only by the chemical nature of the particles, but, to a greater extent, by the porosity of the structure – specifically, the true specific surface area of the particles and their degree of aggregation. The aim of this work is to study the morphology and characteristics of the porous structure and to evaluate the influence of these parameters on the structure and properties of modified wood-polymer composites. To achieve this aim, the following tasks must be addressed: examining the key parameters of the porous structure and surface morphology of mesoporous materials, investigating the effect of mesoporous materials of varying chemical nature on the processing and performance properties of polyvinyl chloride-based wood-polymer composites.

Results. This paper presents results on the specific surface area and porous structure of two types of mesoporous materials, determined by analyzing nitrogen adsorption/desorption isotherms obtained at the boiling point of liquid nitrogen (77 K) using a “TOP 200” specific surface area and pore size analyzer. The specific surface area of the carbon material, calculated according to the Brunauer-Emmett-Teller (BET) theory, was found to be more than 25 times greater than that of the porous silica material. At the same time, the pore volume is ten times higher, characterized by smaller pore diameters. The comparison of processing conditions and the physicochemical and thermal stability characteristics of the compositions revealed that strength properties and melt processability are superior in the presence of the siliceous material, whereas thermal stability is higher in the presence of the mesoporous carbon material.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry lies in the potential to enhance the performance characteristics of wood-polymer materials and reduce the energy consumption associated with their extrusion-based production.

Keywords: mesoporous materials, polyvinyl chloride, wood-polymer composite, porosity, specific surface area

For citation: Abdrakhmanova L.A., A. G. Khantimirov, Nizamov R.K., Khozin V.G., Comparative evaluation of the efficiency of mesoporous materials of different chemical nature for modification of polyvinyl chloride wood-polymer composites // News of KGASU, 2026, № 2 (76), с. 8-22, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.1, EDN: BEEBSO

1. Введение

В последние несколько лет одними из самых динамично развивающихся полимерных строительных материалов являются древесно-полимерные композиты. ДПК. Среди разнообразия полимерных композиционных материалов на современном уровне они одни из самых востребованных в строительной индустрии материалов [1-3]. Статистический анализ развития полимерной продукции в мире прогнозирует, что рынок этих материалов в период 2022-2028 годов будет расти в среднем на 9,16% в стоимостном и на 7,72% в объемном выражении [4,5].

Основные преимущества материалов и изделий из ДПК на основе поливинилхлорида (ПВХ) по сравнению с аналогичными материалами из ДПК на основе

полиолефинов, а именно, полиэтилена и полипропилена, заключаются в высокой жесткости и прочности [6,7], а также устойчивости к действию химически агрессивных сред [8], но в силу специфики молекулярного строения ПВХ композиции могут перерабатываться только в присутствии различных функциональных добавок для улучшения переработки, так как при работе с данным полимером всегда сталкиваются с такими проблемами, как термическая деструкция, дегидрохлорирование и высокая вязкость расплавов [9]. Введение древесной муки в количестве более 40-50 м.ч. заметно ухудшает технологические и эксплуатационные свойства ДПК. Проблемой всех ДПК является необходимость введения связующих агентов для упрочнения межфазной границы полимерная матрица - древесный наполнитель. Такие добавки в достаточно большом количестве рекомендованы для полиэтилена (ПЭ) [8,10,11], а для ПВХ их количество и природа ограничены [12-14].

При составлении рецептуры и выборе связующих агентов, ставя во главе угла повышение механических свойств композитов, необходимо учитывать и их влияние на стабильность полимера и перерабатываемость [15]. Специфика структуры и свойств ПВХ отражается на особенностях взаимодействия с древесным наполнителем и требованиями к выбору связующих агентов. Т.к. ПВХ по сравнению с ПЭ обладает большей полярностью и потому лучше совместим с частицами древесной муки. Но при достаточно высоком содержании древесного наполнителя он тоже требует усиления межмолекулярного взаимодействия между фазами основных компонентов ДПК, в силу того, что разница между полярностями ПВХ и древесины хвойных пород достаточно велика (0,27 и 0,61, соответственно) [16]. Вторым фактором, который требует введения модифицирующих добавок, в первую очередь, связующих агентов, является повышение вязкости расплава при увеличении концентрации древесной муки.

Много разработано эффективных связующих агентов для ДПК-ПЭ. Но, как показали исследования, большинство из них не подходит для композиций ДПК-ПВХ и не приводит к усилению взаимодействия между ПВХ и древесной мукой. В работах разных авторов в качестве связующих агентов рекомендованы добавки самой разной химической природы [17,18], в том числе и нанодобавки: диоксидов кремния [8,14,19], различных типов углеродных наноструктур, в том числе нанотрубок [20-25].

Ранее авторами [14] были рекомендованы для практической реализации ДПК-ПВХ с высоким содержанием древесного наполнителя (до 50%) и малыми дозами (до 0,1- 0,5 м.ч. на 100 м.ч. ПВХ) аморфного синтетического нанокремнезема – аэросила с размером первичных частиц в среднем от 5 до 20 нм. При повышении физико-механических свойств было обнаружено, что введение аэросила отрицательно сказывается на технологических параметрах переработки. Происходит некоторый рост давления расплава в фильере экструдера, а при дальнейшем повышении концентрации аэросила до 1 м.ч. резко увеличивается и загрузка двигателя от его максимальной мощности. Авторы объясняли данный факт тем, что аэросил образует достаточно «мягкие» агломераты, которые в процессе переработки разрушаются, а потому увеличение дисперсности ведет к росту вязкости расплава.

В работе [26] установлено, что углеродные нанотрубки (УНТ) на поверхности органических волокон, в том числе древесных волокон, образуют своеобразные покрытия нанометровой толщины, приводя к снижению кислотности наполнителя. Именно этот факт способствует усилению взаимодействия древесных частиц с поверхностью ПВХ-зерен. Авторы работы [24], основываясь на данных закономерностях, подтвердили, что УНТ способны комплексно изменять свойства ДПК, изменять характер структуры межфазного слоя полимер-наполнитель.

Многие свойства композитов определяют характеристики пористой структуры материалов, входящих в их состав [27,28]. Развитая пористая поверхность мезопористых материалов может быть эффективной с точки зрения усиления взаимодействия с поверхностью компонентов древесно-полимерной композиции - с ПВХ и с древесной мукой. Для описания свойств пористых материалов помимо удельной поверхности часто используют такие параметры, как пористость и удельный объем пор [29,30]. Не менее важными характеристиками являются размер пор и распределение пор по размерам. Чем

выше величина удельной поверхности и наличие узкого распределения пор по размерам, тем больше расширяются области их применения.

Исследований в данном направлении в наполненных полимерных композициях недостаточно. Для конкретных предложений необходимо создание материалов с контролируемым размером, соотношением и объемом мезопор, позволяющих получить комплекс требуемых функциональных свойств.

Целью работы является изучение поровых характеристик двух видов мезопористых материалов и основных функциональных свойств ДПК-ПВХ, содержащих данные добавки в качестве связующих агентов.

Задачами работы являются:

- изучение основных параметров пористой структуры, а также морфологии поверхности мезопористых материалов, а именно углеродной и кремнеземистой природы;

- изучение влияния мезопористых материалов различной химической природы на механические и другие эксплуатационные свойства ДПК-ПВХ, а также на режимы переработки композиций методом экструзии.

Предмет исследования – мезопористые нанодобавки и поливинилхлоридные ДПК, содержащие данные добавки в качестве связующих агентов.

Объект исследования – параметры пористой структуры мезопористых материалов (удельная поверхность, объем и размеры пор, распределение пор по размерам), морфология структуры поверхности нанодобавок, а также технологические и эксплуатационные свойства модифицированных ДПК-ПВХ, а именно показатели текучести расплавов, термостабильности, прочности на растяжение и изгиб.

2. Материалы и методы

В работе рассмотрены два вида мезопористых материалов:

1. мезопористый наноуглерод – это один компонент, образующихся в технологии получения нового класса отечественного синтетического пористого углеродного материала СИБУНИТ;
2. мезопористый диоксид кремния – структурированный материал на основе оксида кремния типа известного МСМ-41, полученного по технологии темплатного синтеза из золя «Полисилиам-5».

В исследованиях для создания композита ДПК-ПВХ основными базовыми компонентами были: суспензионный ПВХ марки С-7059-М; комплексный стабилизатор ПВХ – двухосновный стеарат свинца; смазка-стабилизатор – стеарат кальция, модификатор перерабатываемости и ударной прочности акриловый сополимер марки FM50; наполнитель – древесная мука хвойных пород марки M180.

Образцы для испытаний получены на лабораторном двухшнековом экструдере LabTechScientificLTE 16-40 с фильерой плоского сечения (2х20 мм). Время экструдирования 10-15 мин. Образцы формовались при одинаковом профиле температур экструдера (температура в формующей зоне 210°C).

Испытания образцов-экструдатов проводились согласно действующим ГОСТ на испытания полимерных материалов.

Введение малых доз мезопористых добавок в древесную муку проводили путем приготовления предварительных премиксов с более высокой концентрацией в лабораторном смесителе ЛДУ-3 МПР в течение 2-3 мин при 500 об/мин. В последующем, увеличивая концентрацию древесной муки в премиксе, добивались необходимой концентрации добавок. Подготовленную таким образом древесную муку, обработанную нанодисперсными добавками, смешивали с ПВХ-композицией (включающей все необходимые функциональные компоненты) в количестве 50 м.ч. на 100 м.ч. ПВХ.

Дисперсный состав и распределение частиц по размерам мезопористых добавок получены на лазерном анализаторе Horiba LA-950 с применением ультразвуковой обработки.

Для исследования истинной удельной поверхности образца и его пористости были зарегистрированы изотермы адсорбции/десорбции азота при температуре кипения жидкого азота (77 К). Измерения проводили на анализаторе удельной поверхности и

размеров пор «TOP 200» (Altamira Instruments). Перед проведением анализа образцы подвергались процедуре дегазации. Удельную площадь поверхности (SBET) рассчитывали в соответствии с теорией Брунауэра-Эммета-Теллера в диапазоне p/p_0 от 0,05 до 0,3. Распределение пор по размерам и средний диаметр пор (нм) рассчитывались по методу Баррета-Джойнера-Халенды (BJH). Для анализа микропористости использовались методы Дубинина-Радушкевича (DR) и Дубинина-Астахова (DA) [31].

На рис.1 представлены изотермы адсорбции/десорбции для двух видов мезопористых материалов.

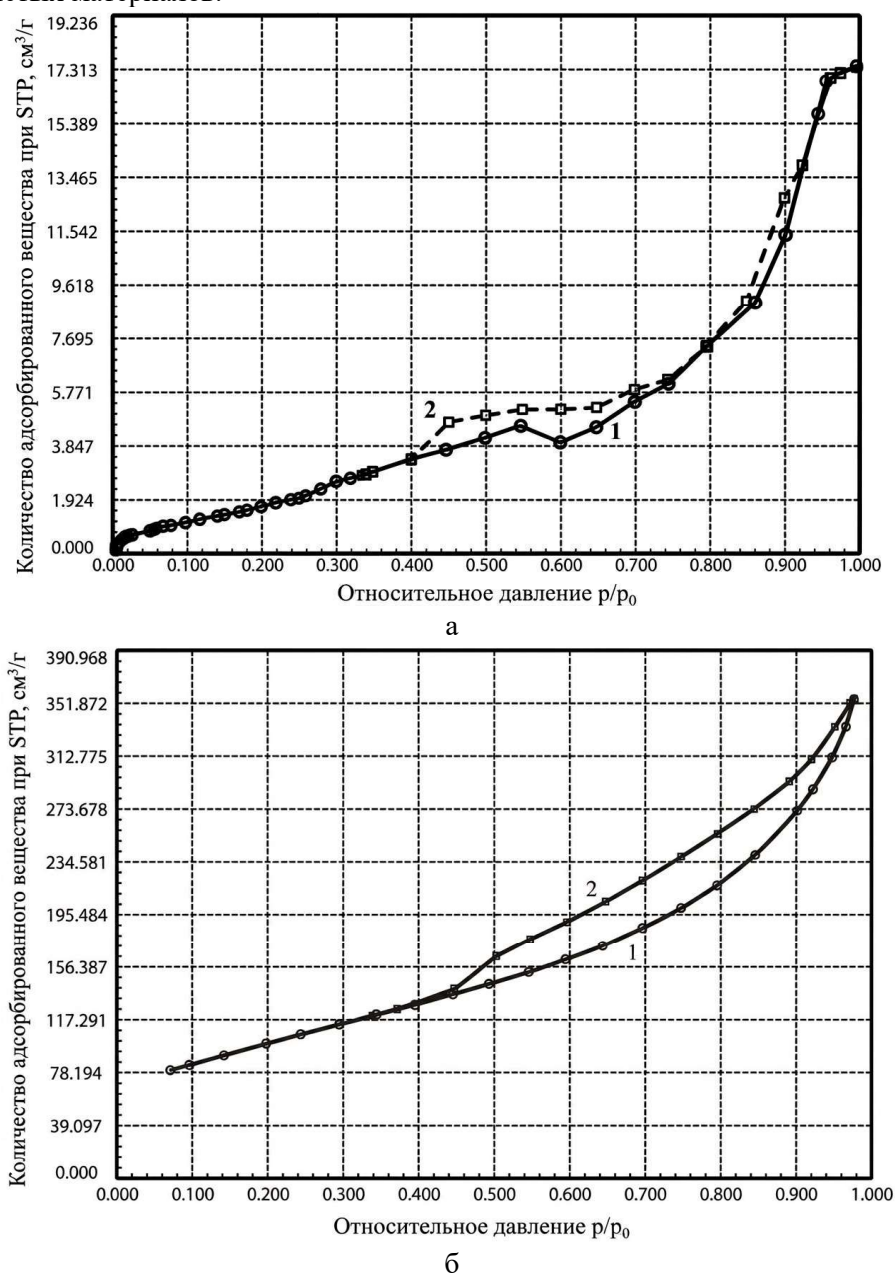


Рис. 1. Изотермы адсорбции (1) и десорбции (2) паров азота при температуре 77 К материалами мезопористого оксида кремния (а) и мезопористого наноклерода (б) (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Nitrogen vapor adsorption (1) and desorption (2) isotherms at 77 K for mesoporous silica (a) and mesoporous nanocarbon (b) materials (illustration by the authors)

Из представленных кривых изотерм следует, что для Сибунита имеет место более ярко выраженное поглощение при низких p/p_0 , связанное с наличием заполненных микропор, характерных для микро-мезопористых углеродных структур. Петля гистерезиса для мезопористого оксида кремния имеет форму, присущую мезопористым материалам, имеющим частично заблокированные мезопоры, что присуще структурированным кремнеземам.

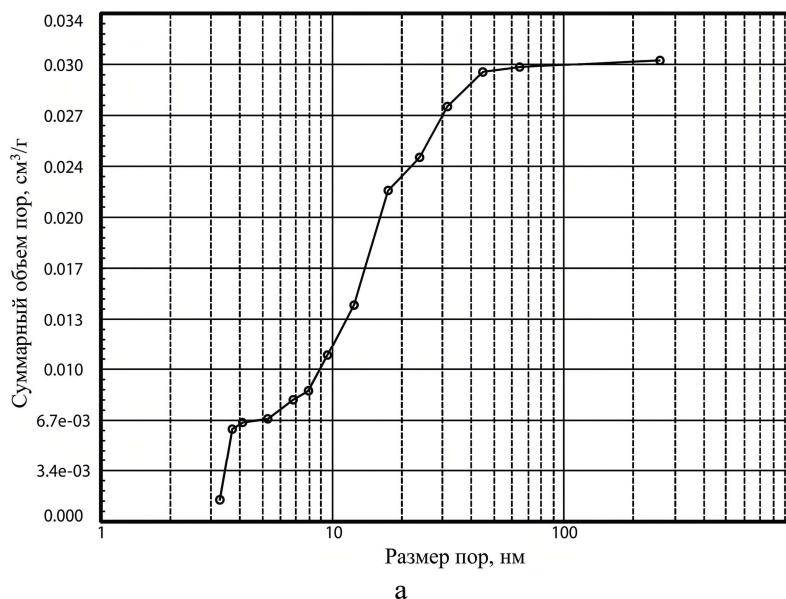
В сводной таблице 1 даны результаты, полученные из анализа изотерм адсорбции/десорбции азота на изученных мезопористых материалах и расчетов параметров пористой структуры.

Таблица 1

Показатели пористой структуры мезопористых материалов

Наименование показателей	Мезопористый оксид кремния	Мезопористый наноуглерод
Удельная площадь поверхности SBET, м ² /г	7,7818	364,6556
Объем пор (адсорбция) по ВЈН, см ³ /г	0,03082	0,47504
Объем пор (десорбция) по ВЈН, см ³ /г	0,03055	0,49765
Средний диаметр пор, нм	13,73779	6,15659
Преобладающий диаметр пор (адсорбция), нм	2,81440	2,15870
Преобладающий диаметр пор (десорбция), нм	3,69627	3,82016
Объем микропор, см ³ /г	-	0,14155

Приведенные данные показывают, что по величине удельной поверхности углеродного материала во много раз превосходит мезопористого оксида кремния, при этом также выше и объем пор. Анализ характера изотерм методом Дубинина–Радускевича (DR) показал наличие в углеродном материале микропор, объем которых составляет порядка 30% пористой структуры материала. В таких порах адсорбция протекает не на поверхности пор, а во всем ее объеме. В этом случае данные, полученные из анализа изотерм по методу Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), считаются не всегда корректными. Для корректного сравнения распределение пор по размерам и средний диаметр пор для обоих материалов проводилось по методу Баррета–Джойнера–Халенды (ВЈН). Чаще всего расчёты проводят по ветви десорбции. Удельный объем во многом определяется размерами пор. На рис. 2 приведены кривые распределения объема пор в зависимости от диаметра. В каждом случае возрастание размеров пор ведет к росту объема пор. Однако для кремнеземистого материала объем пор почти на порядок меньше по сравнению с углеродным. Характерно, что для углеродного материала во всем диапазоне размеров пор общий объем пор при десорбции изменяется равномерно, а в случае кремнеземистого – в интервале от 10 до 65 нм наблюдается увеличенная крутизна возрастания объема пор, которая при дальнейшем росте диаметра пор выходит на плато. Такой характер десорбции может быть связан с частичной блокировкой пор в указанном диапазоне диаметров, то есть с наличием, как открытых, так и частично заблокированных мезопор.



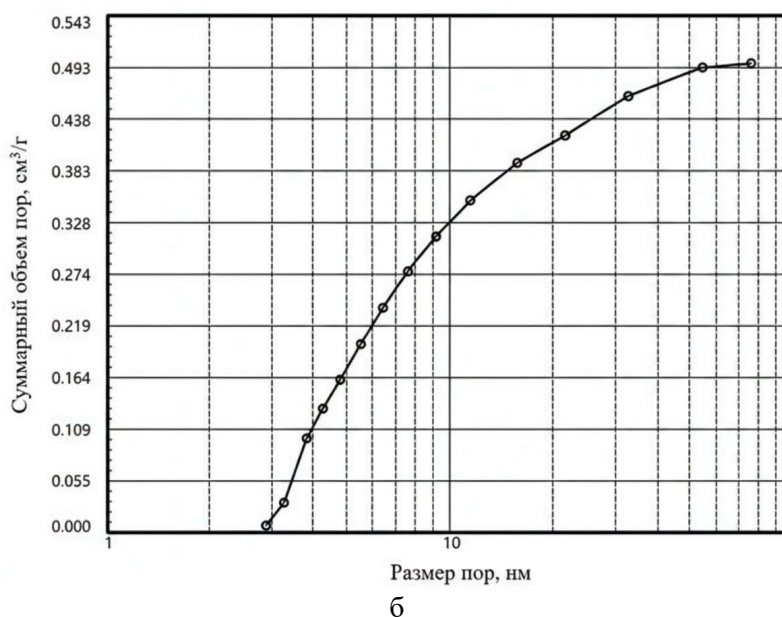
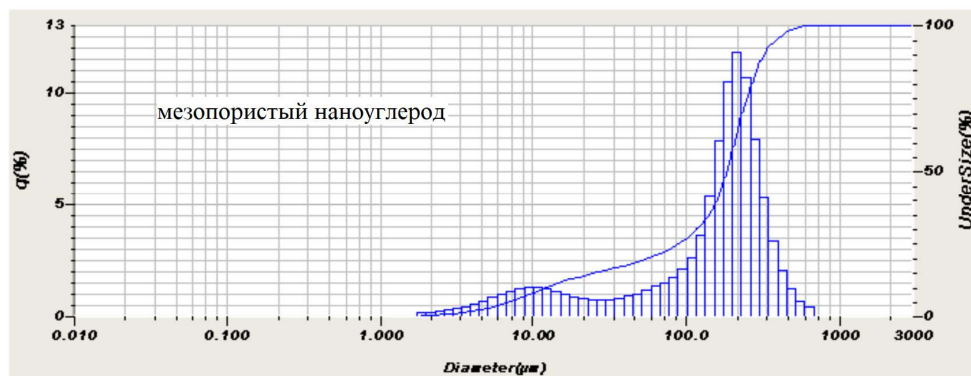


Рис. 2. Распределение объема пор по размерам по данным ВЖН-десорбции для кремнеземистого материала (а) и углеродного материала (б) (иллюстрация авторов)
 Fig. 2. BJH desorption pore size distribution for a siliceous material (a) and a carbonaceous material (b) (illustration by the authors)

Так как частицы данных материалов в силу высоких значений удельных поверхностей агрегированы, то в реальных условиях применения их в композициях с различными матрицами необходимо учитывать размеры агрегатов и их устойчивость. На рис. 3 даны кривые распределения частиц по размерам (РЧР) агрегатов мезопористых материалов, а в таблице 2 представлен анализ полученных из этих кривых данных.



а



б

Рис. 3. Кривые распределения частиц по размерам из данных дифракционного лазерного анализа кремнеземистого (а) и углеродного материала (б) (иллюстрация авторов)
 Fig. 3. Particle size distribution based on laser diffraction analysis data for siliceous (a) and carbonaceous (b) materials (illustration by the authors)

Таблица 2

Анализ данных распределения частиц по размерам мезопористых материалов

Материал	Медианный размер D_{50} , мкм			Среднеобъемный Размер D , мкм	Span= $(D_{max}-D_{min})/$ D_{50}
	Исходный	1 мин УЗ	3 мин УЗ		
Мезопористый оксид кремния	140,27	130,56	123,95	145,65	2,16
Мезопористый наноуглерод	178,26	147,89	144,85	167,97	1,69

Из анализа представленных данных следует, что РЧР характеризуется разной степенью бимодальности для двух видов мезопористых материалов. Ширина распределения частиц по размерам Span выше для кремнеземистого материала (2,16) по сравнению с мезопористым углеродом (1,69), что является следствием более высокой степени агрегированности частиц неорганического мезопористого материала. При этом, в мезопористом оксиде кремния фракции агрегатов имеют сравнительно широкий интервал по размерам частиц. Это факт может быть эффективным при применении для формирования более плотной структуры композита.

Для исследованных материалов УЗ-воздействие практически не оказывает влияния, то есть агрегаты частиц достаточно устойчивы.

Микрофотографии агрегатов частиц представлены на рисунке 4.

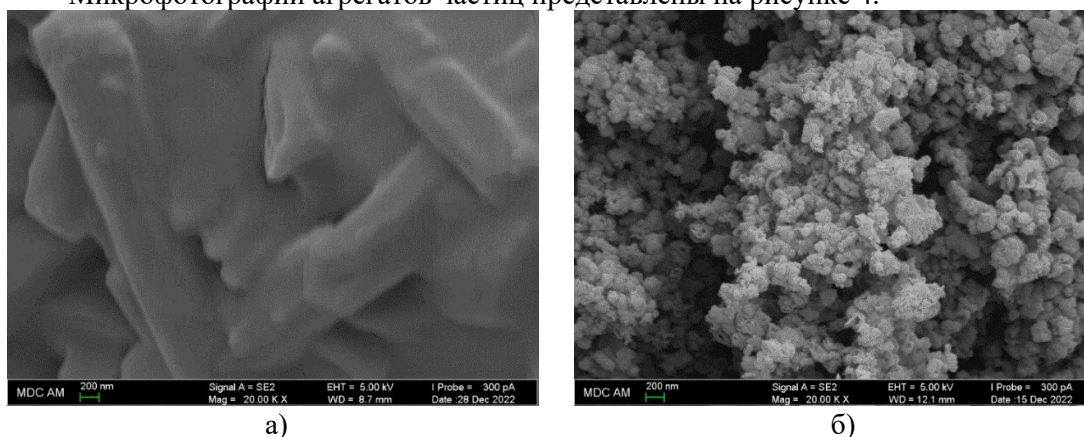


Рис. 4. Микрофотографии кремнеземистого (а) и углеродного (б) мезопористых материалов: увеличение $\times 20000$ (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Micrographs of siliceous (a) and carbon (b) mesoporous materials: magnification $\times 20,000$ (illustration by the authors)

Углеродный наноматериал представлен как ассоциат, состоящий из полых глобулярных образований. Имеет место формирование почти идеальных сферических агрегатов частиц. Кремнеземистый материал представляет собой структуру из каркасов полых агрегатов.

Все эти особенности – морфология поверхности агрегатов и характер их пористой структуры определяют их влияние на технологические и эксплуатационные свойства полимерных композиций на основе ДПК-ПВХ.

3. Результаты и обсуждения

При обсуждении изменения технологических и эксплуатационных свойств ДПК, модифицированных мезопористыми материалами учтены выявленные особенности их морфологии и пористой структуры. В таблице 3 представлены результаты основных характеристик ДПК-ПВХ, содержащих одинаковое количество мезопористых материалов.

Содержание добавок 0,35% от массы древесной муки в полимерной композиции ПВХ-древесная мука выбрано с учетом данных предыдущих исследований по подбору состава связующих агентов в ДПК-ПВХ [13].

В качестве параметров, характеризующих перерабатываемость модифицированных композиций, выбраны показатель текучести расплавов (ПТР) и параметры экструдирования (загрузка двигателя экструдера от его максимального значения, давление в фильере и скорость вращения шнеков).

Таблица 3

Свойства модифицированных мезопористыми структурами ДПК

Показатель	Составы, содержание добавок 0,35% от массы муки		
	Без добавки	Мезопористый оксид кремния	Мезопористый наноглерод
Прочность при растяжении, МПа	32	37	32
Прочность при изгибе, МПа	50	56	52
Истираемость, мкм	216	199	210
Водопоглощение, %	1,68	1,6	1,43
Плотность, г/см ³	1,16	1,19	1,17
Разбухание экструдата	1,05	1,00	1,01
ПТР, г/10 мин	0,49	1,27	0,66
Термостабильность, мин	225	189	229
Скорость шнеков, об/мин	20		
Загрузка двигателя, % от max	30	25	28
Давление в фильере, бар	20	16	17

Сравнение технологических и эксплуатационных показателей ДПК-ПВХ позволяет сделать следующие выводы.

Значительно выше (почти в 2,5 раза) показатель текучести расплава композиций, содержащих мезопористый оксид кремния. Этот факт подтверждает, что течение расплава в цилиндре экструдера в данном случае, и, по существу, в целом при экструдировании расплава имеет место по границе полимер-наполнитель, а не через граничный слой. Как было показано выше (рис.2), объем пор для кремнеземистого материала меньше, что и обуславливает меньшую величину адсорбции этой добавки на поверхности древесной муки. Такие показатели, как прочность при растяжении и прочность при изгибе для композита выше в присутствии кремнеземистого материала. Это говорит о том, что более низкая вязкость расплава при переработке способствует формированию однородных совместных структур на границе полимер-наполнитель, и тем самым содействует увеличению механических свойств.

С данными по ПТР согласуются и технологические параметры экструзии. Мезопористый оксид кремния в силу вытянутой ассиметричной каркасной структуры агрегатов при экструдировании ведет себя подобно слоистым силикатам, а именно, ориентируясь по направлению течения расплава, снижает вязкость расплава. Мезопористый углерод за счет высокой дисперсности и образования своеобразного «покрытия» на частицах древесной муки, и тем самым сглаживая неровности их поверхности, также приводит к небольшому увеличению сдвиговой скорости расплава.

Разбухание экструдатов за счет меньшего сопротивления расплава при выходе из фильеры также уменьшается, в частности для экструдатов с мезопористыми силикатами данный показатель равен 1. Этому способствует снижение давления в фильере.

Необходимо еще отметить [14], что при использовании мезопористого оксида кремния имеет место и некоторое снижение горючести композитов, оцененное по следующим показателям: уменьшение времени самостоятельного горения после выноса из пламени (2,5 с против 4,7 с) и увеличение остатка массы образца после прекращения горения (9,3% против 13,8%).

Эффективность углеродного мезопористого материала выше с точки зрения термической стабильности композиций, так как время термостабильности выше, чем для немодифицированной композиции и значительно превышает данный показатель в присутствии мезопористого оксида кремния (229 мин против 189 мин). Таким образом, более высокая вязкость расплавов в данном случае компенсируется значительным повышением термостабильности.

Рост термостабильности для образцов, содержащих древесную муку, модифицированную мезо-микропористым углеродным материалом обусловлен, вероятно, сорбцией хлористого водорода, выделяющегося при термодеструкции. Но возможна

сорбция не только хлористого водорода, но и тех органических кислот, которые являются продуктом деструкции древесной муки при высокотемпературной переработке.

«Гостевая» молекула может удерживаться внутри благодаря сорбционным силам [32]. Например, в работе [33] показано, что атомы «гостевых» молекул могут адсорбироваться во внутренних полостях углеродных нанотрубок, достигающих размеров от 0,4 до нескольких нанометров. По данным авторов [34], стабилизирующий эффект углеродных наноструктур может быть обусловлен их барьерными свойствами и химическим взаимодействием УНТ с макрорадикалами, образующимися в процессе разложения полимера.

В случае использования мезопористого оксида кремния, как было показано из характера кривых десорбции, часть мезопор заблокирована и недоступна для молекул, выделяющихся при деструкции газов (термостабильность оказывается даже ниже немодифицированных образцов).

Изменения в структуре ДПК сказываются на деформационно-прочностных характеристиках, отражающих их поведение в условиях деформации растяжения и изгиба, и соответственно и на величинах модулей упругости. На рисунке 5 показано поведение образцов при растяжении для композитов с мезопористым оксидом кремния в виде кривых деформирования при скорости нагружения 100 мм/мин.

Расчет показателей модулей упругости проводился по величине тангенса угла наклона на начальных участках кривых растяжения, полученных согласно требований ГОСТ 9550-81 при скоростях нагружения 1 мм/мин и 2 мм/мин при растяжении и при изгибе, соответственно. Показано, что модуль упругости при растяжении в присутствии мезопористого оксида кремния увеличивается с 2709 до 3178 МПа, а модуль упругости при изгибе практически не изменяется.

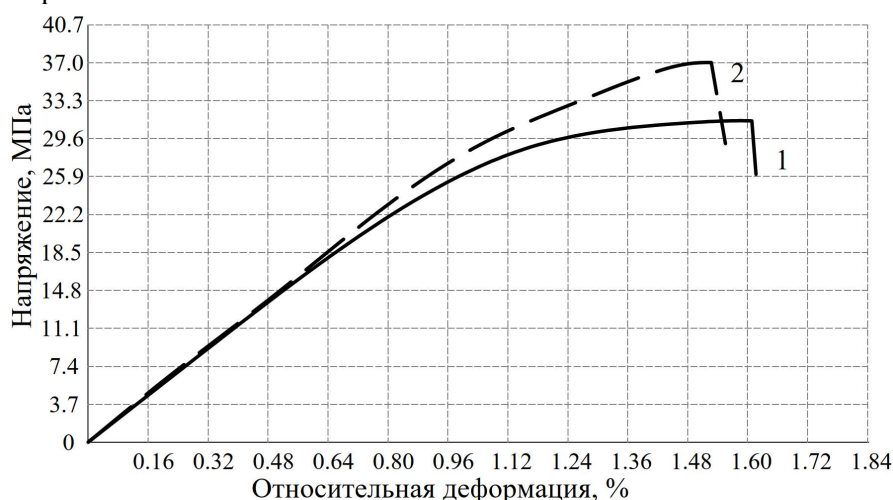


Рис. 5. Кривые растяжения: 1 – немодифицированного композита; 2 – с 0,35% мезопористого оксида кремния (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Tensile curves: 1 – unmodified composite; 2 – with 0.35% mesoporous silica (illustration by the authors)

4. Заключение

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Обзор отечественных и зарубежных источников в области модификации ДПК на основе ПВХ, направленной на поиск эффективных связующих агентов, показал перспективность и научную новизну применения в качестве таковых наноструктур разной природы. Их эффективность обусловлена возможностью создания нанотолщинных межфазных слоев на границе ПВХ-древесная мука разной степени упрочнения и химической природы. Данные о влиянии мезопористых наноматериалов, которые находят широкое применение в различных технологиях, на технологические и эксплуатационные свойства композитов практически отсутствуют.

2. Оценка площади поверхности распределения пор по размерам двух видов мезопористых материалов различной по химической природе, а также изучение степени их агрегированности и морфологии поверхности частиц положены в основу объяснения

эффектов, обнаруженных при создании ДПК-ПВХ с данными модификаторами. Анализ кривых адсорбции и десорбции выявил, что оба использованных в работе материала относятся к мезопористым структурам. Причем по форме петли гистерезиса согласно IUPAC 1985 года, относятся к разным типам: мезопористый оксид кремния характеризуются петлей типа H2, а углеродный микро-мезопористый материал относится к типу H4. При этом для кремнеземистого материала объем пор почти на порядок меньше по сравнению с углеродным. Эти данные непосредственно отражаются на их поведение в матрице древесно-полимерного композита.

3. Анализ основных технологических и физико-механических свойств ДПК-ПВХ показал, что данные модификаторы, играя роль связующего агента в композиции, оказывают разное функциональное действие, а именно: если мезопористый оксид кремния способствует облегчению перерабатываемости и повышает показатели прочности композитов, то микро-мезопористый углеродный материал в большей степени оказывает термостабилизирующее действие.

Список литературы / References

1. Талалаева Г.В., Пазникова С.Н. Современные композиционные материалы: перспективы и риски применения их в области комплексной безопасности и гражданской обороны // Технологии гражданской безопасности. 2023. Т. 20. № 1(75). С. 107-114. DOI:10.54234/CST.19968493.2023.20.1.75
Talalaeva G.V., Paznikova S.N. Modern composite materials: prospects and risks of their application in the field of integrated security and civil defense // Civil security technologies. 2023. Vol. 20. No. 1(75). P. 107-114. DOI:10.54234/CST.19968493.2023.20.1.75
2. Горбачев А.В., Файзуллин И.З., Вольфсон С.И., Казаков Ю.М. Лигноцеллюлозные наполнители и методы их модификации // Вестник Технологического университета. 2022. Т. 25. № 8. С. 148-157. DOI: 10.55421/1998-7072
Gorbachev A.V., Fayzullin I.Z., Wolfson S.I., Kazakov Yu.M. Lignocellulose fillers and methods of their modification // Bulletin of the Technological University. 2022. Vol. 25. No. 8. P. 148-157. DOI: 10.55421/1998-7072
3. Кондращенко В.И., Адылходжаев А.И., Ван Чжуан, Исмагилова Л.И. Инновационные конструкции и технология изготовления композиционных шпал // Полимеры в строительстве: научный Интернет-журнал. 2024. № 1(12). С. 45-48.
Kondrashchenko V.I., Adylkhodzhaev A.I., Wang Zhuang, Ismagilova L.I. Innovative designs and manufacturing technology of composite sleepers // Polymers in construction: scientific Online journal. 2024. No. 1(12). P. 45-48.
4. Горбачев А.В., Файзуллин И.З., Вольфсон С.И. Разработка полимерных композитов на основе полипропилена и модифицированной рисовой лузги для строительной отрасли // Полимеры в строительстве: научный Интернет-журнал. 2024. № 1(12). С. 125-128.
Gorbachev A.V., Fayzullin I.Z., Wolfson S.I. Development of polymer composites based on polypropylene and modified rice husk for the construction industry // Polymers in construction: scientific Online journal. 2024. No. 1(12). P. 125-128.
5. Global Wood Plastic Composites Market 2022-2028 // www.researchandmarkets.com; URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5019006/global-wood-plastic-composites-market-2022-2028> (дата обращения: 20.05.2026).
Global Wood Plastic Composites Market 2022-2028 // www.researchandmarkets.com; URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5019006/global-wood-plastic-composites-market-2022-2028> (reference date: 20.05.2026).
6. Мороз П.А. Аскадский А.А., Матеевич Т.А., Аскадский А.А., Романова Е.И. Древесно-полимерные композиты: структура, свойства и применение: монография. М.: АСВ, 2020. 200 с.

- Moroz P.A. Askadsky A.I., Matseevich T.A., Askadsky A.A., Romanova E.I. Wood-polymer composites: structure, properties and application: monograph. Moscow: ASV, 2020. 200 p.
7. Жданова Т.В. Оценка модулей упругости смесей древесно-полимерных композитов с минеральным наполнителями / Т.В. Жданова // Строительные материалы. 2023. № 1. С. 106-111. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-106-111>
Zhdanova T.V. Estimation of elastic modulus of mixtures of wood-polymer composites with mineral fillers / T.V. Zhdanova // Building materials. 2023. No. 1. P. 106-111. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-106-111>
 8. Jiang J. Improved mechanical properties and hydrophobicity on wood flour reinforced composites: Incorporation of silica/montmorillonite nanoparticles in polymers / J. Jiang, C. Mei, M. Pan, J. Cao // Polymer Composites. 2020. Vol. 41. No. 3. P. 1090-1099. DOI: 10.1002/pc.25440
 9. Асфандиярова Л.Р., Хакимова Г.В., Овсянникова И.В., Матвеева А.Ю. Древесно-полимерные наномодифицированные строительные композиционные материалы // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15. № 6. С. 543–551. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-543-551>
Asfandiyarova L.R., Khakimova G.V., Ovsyannikova I.V., Matveeva A.Yu. Wood-polymer nanomodified building composite materials // Nanotechnology in construction. 2023. Vol. 15. No. 6. P. 543-551. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-543-551>
 10. Симонов-Емельянов И.Д. Структура и свойства древесно-наполненных полимерных композиционных материалов –С-Петербург: ЦОП «Профессия» 2024. 280 с.
Simonov-Yemelyanov I.D. Structure and properties of wood-filled polymer composite materials –St. Petersburg: TSOP “Profession” 2024. 280 p.
 11. Сафин Р.Г., Фахрутдинов Р.Р., Байгильдеева Е.И., Зиятдинова Д.Ф. Влияние различных полимеров и технологических добавок на свойства древесно-полимерных композитов // Системы Методы Технологии. 2022. № 2(54). С. 114-118. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-2-114-118
Safin R.G., Fakhrutdinov R.R., Baygildeeva E.I., Ziatdinova D.F. The influence of various polymers and technological additives on the properties of wood-polymer composites // Systems and Methods of Technology. 2022. No. 2(54). P. 114-118. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-2-114-118
 12. Islamov A., Fakhrutdinova V. Surface modification of PVC by silica sol // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 1 P. 012083. DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012083
 13. Бурнашев А.И., Ашрапов А.Х., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Структура и свойства модифицированного древесно-полимерного композита на основе поливинилхлорида // Строительные материалы. 2014. № 1. С. 104-106.
Burnashev A.I., Ashrapov A.Kh., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K. Structure and properties of a modified wood-polymer composite based on polyvinyl chloride // Building Materials. 2014. No. 1. P. 104-106.
 14. Purcar, V. Preparation and characterization of some sol-gel modified silicacoatings deposited on polyvinyl chloride (Pvc) substrates / V. Purcar, V. Rădițoiu, A. Rădițoiu et al. // Coatings. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 1-13. DOI: 10.3390/coatings11010011.
 15. Л.А. Абдрахманова, Р.Р. Галеев, А.Г. Хантимиров, В.Г. Хозин. Эффективность углеродных наноструктур в составе древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида// Нанотехнологии в строительстве. 2021. Т.13. № 3. С. 150-157.
L.A. Abdrakhmanova, P.R. Galeev, A.G. Khantimirov, V.G. Khozin Efficiency of carbon nanostructures in wood-polymer composites based on polyvinyl chloride// Nanotechnology in construction. 2021. Vol. 13. No. 3. P. 150-157.
 16. Нигматуллина А.И., Вольфсон С.И., Казаков Ю.М. Межмолекулярное взаимодействие в древесно-полимерных композитах // Технология

- органических веществ: материалы 88-й науч.-технич. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов – Минск: БГТУ, 2024. С. 141–144.
- Nigmatullina A.I., Wolfson S.I., Kazakov Yu.M. Intermolecular interaction in wood-polymer composites // *Technology of organic substances: materials of the 88th scientific and technical Conference of faculty, researchers and post-graduate students* - Minsk: BSTU, 2024. P. 141-144.
17. Ghalehno M.D., Kord B., Adlnasab L. Effects of various types of modified nanoclay on the physical, mechanical, and viscoelastic characteristics of lignocellulosic filler-reinforced PVC composites // *Research Square*. 2021. P. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-510353/v1>
18. Taghiyari H.R., Morrell J.J., Husen A. *Emerging Nanomaterials. Opportunities and Challenges in Forestry Sectors* // Springer. 2023. 369 p.
19. Шкуро А.Е., Матонин А.Н. Древесно-полимерные композиты с пудрой оксида кремния // *Вестник технологического университета*. 2020. Т. 23. № 6. С. 73-77.
- Shkuro A.E., Matonin A.N. Wood-polymer composites with silicon oxide powder // *Bulletin of the Technological University*. 2020. Vol. 23. No. 6. P. 73-77.
20. Запорожкова И.В., Крутойаров А.А., Поликарпова Н.П. Теоретические исследования полимерных нанокомпозитов на основе полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида, армированных углеродными нанотрубками // *Перспективные материалы*. 2015. № 3. С. 5-11.
- Zaporotskova I.V., Krutoyarov A.A., Polikarpova N.P. Theoretical studies of polymer nanocomposites based on polyethylene, polypropylene and polyvinyl chloride reinforced with carbon nanotubes // *Promising materials*. 2015. No. 3. P. 5-11.
21. Микитаев А.К., Козлов Г.В. Зависимость степени усиления нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки от размерности нанонаполнителя // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 462. № 1. С. 41-44.
- Mikitaev A.K., Kozlov G.V. Dependence of the degree of amplification of polymer/carbon nanotube nanocomposites on the dimension of the nanofiller // *Reports of the Academy of Sciences*. 2015. Vol. 462. No. 1. P. 41-44.
22. Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Особенности наномодификации строительных полимеров (ПВХ и эпоксидных) // *Материалы 18 Международной конференции по химии и физикохимии олигомеров Нижний Новгород, 2019*, С.67.
- Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khozin V.G. Features of nanomodification of building polymers (PVC and epoxy) // *Proceedings of the 18th International Conference on chemistry and physical chemistry of oligomers Nizhny Novgorod, 2019*, P. 67.
23. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Пчельников А.В., Смирнова О.Е. Повышение качества полимерсодержащих композитов за счет применения нанодобавок // *Полимеры в строительстве: научный Интернет-журнал*. 2024. № (12). С. 61-63.
- Pichugin A.P., Khritankov V.F., Pchelnikov A.V., Smirnova O.E. Improving the quality of polymer-containing composites through the use of nano-additives // *Polymers in construction: scientific Online Journal*. 2024. No. 1(12). P. 61-63.
24. Абдрахманова Л.А., Хантимиров А.Г., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Древесно-полимерные наномодифицированные поливинилхлоридные строительные композиты // *Вестник МГСУ*. 2018. № 4(13). С. 426-434. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.4.426-434.
- Abdrakhmanova L.A., Khantimirov A.G., Nizamov R.K., Khozin V.G. Wood-polymer nanomodified polyvinyl chloride building composites // *MGSU Bulletin*. 2018. No. 4(13). P. 426-434. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.426-434.
25. Ge S., Zuo S., Zhang M., Luo Y., Yang R., Wu Y., Zhang Y., Li J., Xia Ch. Utilization of decayed wood for polyvinyl chloride/wood flour composites // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 12. P. 862-869. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.026.

26. Liu Y., Wang X., Qia K., Xin J.H. Functionalization of cotton with carbon nanotubes // *Journal of Materials Chemistry*. 2008. Vol. 18. P. 3454-3460. DOI: 10.1039/b801849a.
27. Кудрявцев П.Г. Основные пути создания пористых композиционных материалов // *Нанотехнологии в строительстве*. 2020. Т. 12. № 5. С. 256–269. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-5-256-269
Kudryavtsev P.G. The main ways of creating porous composite materials // *Nanotechnology in construction*. 2020. Vol. 12. No. 5. P. 256-269. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-5-256-269
28. Сухинина Н.С., Ходос И.И., Зверькова И.И., Туранов А.Н., Карандашев В.К., Емельченко Г.А. Структурные особенности и сорбционные свойства мезопористого углеродного материала, полученного из природного шунгита // *Неорганические материалы*. 2022. Т. 58. № 10. с. 1151–1159. DOI: 10.31857/S0002337X22100141
Sukhinina N.S., Khodos I.I., Zverkova I.I., Turanov A.N., Karandashev V.K., Yemelchenko G.A. Structural features and sorption properties of mesoporous carbon material obtained from natural shungite // *Inorganic materials*. 2022. Vol. 58. No. 10. P. 1151-1159. DOI: 10.31857/S0002337X22100141
29. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // *Pure Appl. Chem*. 2015. Iss. 87(9-10). P. 1051–1069. DOI: 10.1515/pac-2014-1117.
30. Неизвестная С.В. Влияние параметров синтеза мезопористых материалов на совокупность их сорбционно-текстурных свойств // *Физика и химия стекла*. 2021. Т. 47. № 2. С. 229-236. DOI: 10.31857/S0132665120060177.
Neizvestnaya S.V. Influence of the synthesis parameters of mesoporous materials on the totality of their sorption and textural properties // *Physics and Chemistry of Glass*. 2021. Vol. 47. No. 2. P. 229-236. DOI: 10.31857/S0132665120060177.
31. Jianlong Wang,, Xuan Guo Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method // *Chemosphere*. 2020. Vol. 258. P. 127279. DOI:10.1016/j.chemosphere.2020.127279
32. Кузнецова Т.С., Бураков А.Е., Пасько Т.В., Буракова И.В., Дьячкова Т.П., Меметова А.Е. Физико-химические и сорбционные свойства нанокompозитного аэрогеля на основе модифицированных углеродных нанотрубок и графена. *Известия вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. №. 3. С. 66-76. DOI: 10.6060/ivkkt.20236603.6726.
Kuznetsova T.S., Burakov A.E., Pasko T.V., Burakova I.V., Dyachkova T.P., Memetova A.E. Physicochemical and sorption properties of a nanocomposite aerogel based on modified carbon nanotubes and graphene. *News of Universities. Chemistry and chemical technology*. 2023. Vol. 66. No. 3. P. 66-76. DOI: 10.6060/ivkkt.20236603.6726.
33. Gomez B., Martínez J.-M. A Theoretical study of dibenzothiophene absorbed on open-ended carbon nanotubes // *J. Phys. Chem. B*. 2005. Iss. 109 (31). P. 14868–14875. DOI: 10.1021/jp050615o
34. Marosi B.B. Thermal and spectroscopic characterization of polypropylene-carbon nanotube composite / B.B. Marosi. A. Szabo, Gy. Marosi, D. Tabuani // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2006. Vol. 3. P. 669-673. DOI: 10.1007/s10973-006-7891-9.

Информация об авторах

Абдрахманова Ляйля Абдулловна, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: laa@kgasu.ru, ORCID: 0000-0003-3905-5730

Хантимиров Аяз Габдрашитович, кандидат технических наук, старший преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: khantimirov94@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-3039-5408

Низамов Рашид Курбангалиевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Академик Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: Nizamov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-3448-7369

Хозин Вадим Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X

Information about the authors

Lyalya A. Abdrakhmanova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: laa@kgasu.ru, ORCID: 0000-0003-3905-5730

Ayaz G. Khantimirov, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: khantimirov94@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-3039-5408

Rashit K. Nizamov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation

E-mail: Nizamov@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-3448-7369

Vadim G. Khozin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X

Дата поступления: 22.06.2026

Дата принятия: 28.09.2026