УДК 674.07 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-178-186

Технология модификации алкидно-уретановых покрытий для защиты древесины с помощью углеродных наноматериалов

О.А. Белова[a], А.Н. Чубинский[b]

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия
[a] oblkm@mail.ru, [b] a.n.chubinsky@gmail.com.
[a] https://orcid.org/0009-0000-3850-1538, [b] https://orcid.org/0000-0001-7914-8056.
Статья поступила 02.07.2026, принята 10.09.2026.

Алкидно-уретановые покрытия широко применяются для защиты изделий из древесины, однако их эксплуатационные характеристики нуждаются в улучшении, особенно для применения в условиях атмосферной нагрузки. В работе исследована возможность модификации таких покрытий малыми количествами углеродных наноматериалов различной геометрии – фуллерена C_{60}, графена, нанографита и алмазной шихты. Экспериментально установлено, что характер влияния наномодификаторов на кинетику отверждения, адгезию, эластичность и ударную вязкость определяется видом частиц и их концентрацией. Сферические и высокодисперсные частицы (фуллерен C_{60}, алмазная шихта) положительно влияют на перечисленные свойства. Пластинчатые частицы (графен, нанографит), напротив, замедляют отверждение и снижают деформационные свойства. Полученные регрессионные уравнения позволяют прогнозировать время отверждения в зависимости от концентрации модификатора и типа подложки. Установленные закономерности создают научную основу для разработки импортозамещающих лакокрасочных систем на основе алкидно-уретановых смол.

Ключевые слова: алкидно-уретановые покрытия; углеродные наноматериалы; фуллерен C_{60}; алмазная шихта; графен; нанографит; модификация лакокрасочных материалов; защита древесины; адгезия; отверждение; древесина сосны; древесина дуба.

Technology for modifying alkyd-urethane coatings for wood protection using carbon nanomaterials

O.A. Belova[a], A.N. Chubinsky[b]

St. Petersburg State Forestry University; 5, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia
[a] oblkm@mail.ru, [b] a.n.chubinsky@gmail.com.
[a] https://orcid.org/0009-0000-3850-1538, [b] https://orcid.org/0000-0001-7914-8056.
Received 02.07.2026, accepted 10.09.2026.

Alkyd-urethane coatings are widely used to protect wood products; however, their performance characteristics require improvement, especially for use under atmospheric loading. This study investigates the possibility of modifying such coatings with small amounts of carbon nanomaterials of various geometries – fullerene C60, graphene, nanographite, and diamond charge. It has been experimentally established that the effect of nanomodifiers on curing kinetics, adhesion, elasticity, and impact toughness is determined by the particle type and their concentration. Spherical and highly dispersed particles (fullerene C_{60}, diamond charge) positively affect the listed properties. Conversely, lamellar particles (graphene, nanographite), slow curing and reduce deformation properties. The resulting regression equations allow one to predict curing time depending on modifier concentration and substrate type. The established patterns create a scientific basis for the development of import-substituting paint and varnish systems based on alkyd-urethane resins.

Keywords: alkyd-urethane coatings; carbon nanomaterials; fullerene C_{60}; diamond charge; graphene; nanographite; modification; wood protection; adhesion; curing; pine wood; oak wood.

Введение. Уход ведущих зарубежных производителей лакокрасочных материалов (ЛКМ) с российского рынка в 2022 году выявил критическую зависимость отечественной деревообрабатывающей промышленности от зарубежных защитно-декоративных материалов, что обусловило необходимость ускоренного развития импортозамещающих технологий [10, 12]. В этой связи актуальной задачей является модификация существующих отечественных лакокрасочных систем для достижения эксплуатационных характеристик, сопоставимых с зарубежными аналогами [14].

Среди различных классов пленкообразователей алкидно-уретановые олигомеры выделяются как одни из наиболее перспективных материалов для создания покрытий для древесины. Интерес к ним обусловлен сочетанием ценных свойств: высокой твёрдости, хорошей адгезии к древесным субстратам и доступности сырья [5, 13]. Несмотря на широкое практическое применение, технологические и эксплуатационные свойства алкидно-уретановых покрытий не являются оптимальными и могут быть значительно улучшены. Перспективным подходом к решению этой проблемы яв-

ляется целенаправленная модификация состава, позволяющая контролировать структуру и, следовательно, конечные свойства полимерного материала.

Одним из наиболее многообещающих подходов к улучшению свойств полимерных покрытий является модификация основы углеродными наноматериалами (УНМ). Высокая удельная площадь поверхности и способность УНМ влиять на пространственную организацию полимера позволяют вводить наночастицы даже в низких концентрациях, сотые и тысячные доли процента по массе, что значительно изменяет структуру и эксплуатационные характеристики композитов [2].

Область наноструктурных и нанокомпозитных материалов, будучи относительно новой, переживает быстрое развитие. В настоящее время накоплен значительный опыт их использования. Было показано, что геометрия наночастиц определяет механизм композитного армирования, а характер поверхностной структуры наночастиц влияет на взаимодействие нанонаполнителя с полимерной матрицей [2, 4]. Установлено, что определённые типы углеродных наночастиц, в частности ультрадисперсные алмазы, могут ускорять отверждение полиуретановых и акриловых покрытий, повышая их твёрдость и устойчивость к агрессивным средам при сохранении эластичности и прочности [4, 7]. Однако, несмотря на доказанную эффективность наномодификации двухкомпонентных покрытий, влияние углеродных наночастиц на свойства алкидно-уретановых покрытий, предназначенных для защиты древесины, изучено недостаточно. В частности, не установлено влияние типов углеродных наночастиц, их концентрацией на защитные и декоративные свойства алкидно-уретановых покрытий при использовании для изделий из древесины в условиях атмосферного воздействия.

Цель исследования – разработка научно обоснованного подхода к модификации алкидно-уретановых лакокрасочных материалов углеродными наночастицами для получения покрытий с улучшенным комплексом технологических и эксплуатационных характеристик, обеспечивающих эффективную защиту изделий из древесины в условиях атмосферного воздействия.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- приготовление стабильных дисперсий углеродных наноматериалов (фуллерен C_{60}, графен, нанографит и алмазная шихта) в органических растворителях;
- модификация алкидно-уретанового связующего наночастицами в концентрациях 0,005–0,050 %;
- формирование однослойных покрытий на стекле, металле и древесине (сосна, дуб);
- исследование кинетики отверждения, адгезии (в сухих и влажных условиях), эластичности и ударной вязкости покрытий;
- проведение статистической обработки экспериментальных данных;
- определение оптимальных составов на основе сравнительного анализа влияния типа и концентрации наномодификаторов.

Методика исследования. На основе предварительных исследований в качестве объекта исследования выбрана алкидно-уретановая смола («полуфабрикат-лак») российского производства (завод ООО «Бальзам»), «марки А», предназначенной для отделки изделий из древесины, с добавлением сиккатива на основе кобальта в количестве 1,5 % от массы смолы.

Для модификации лака использовали четыре вида углеродных наноматериалов, отобранных по результатам предварительных исследований стабильности их дисперсий [1]: фуллерен C_{60}, графен, нанографит (НГ), алмазная шихта (АШ).

Для стабилизации наночастиц и предотвращения их агрегации применяли поверхностно-активное вещество (ПАВ), а в качестве дисперсионных сред – органические растворители: толуол и ацетон [11]. Дисперсии готовили методом ультразвукового диспергирования; концентрации УНМ и ПАВ, а также режимы обработки соответствовали оптимальным параметрам, установленным в предварительной работе [1]. Для фуллерена C_{60} играфена использовали дисперсии без добавления ПАВ, для нанографита и алмазной шихты – с добавлением олеиновой кислоты, что обеспечивало максимальную стабильность систем в течение времени, необходимого для введения в полуфабрикат-лак.

Модификацию алкидно-уретанового лака осуществляли путём смешения его с рассчитанным количеством дисперсии УНМ. Концентрации нанодобавок в готовом лаке составляли 0,005, 0,010 и 0,050 % впересчёте на массовую долю нелетучих веществ. Общее количество исследуемых составов, включая немодифицированный контрольный образец, составило 13.

В основу (полуфабрикат-лак) добавляли дисперсию наноматериалов в заданном количестве и перемешивали с использованием магнитной мешалки в течение 1 часа. В процессе перемешивания контролировали температуру смолы: для всех составов, за исключением содержащих фуллерен C_{60}, температура поддерживалась на уровне 30 °C. Для составов с фуллереном C_{60} температура не превышала 20 °C, для сохранения максимальной растворимости [9]. После перемешивания все образцы выдерживали в течение 24 часов при комнатной температуре для контроля стабильности дисперсий и отсутствия признаков агрегации или расслоения.

В качестве подложек для формирования покрытий использовали:

- стеклянные пластины размером 50×100 мм (для определения времени отверждения);
- металлические тест-пластины размером 100×150 мм (для испытаний на ударную прочность и эластичность при изгибе);
- образцы древесины сосны и дуба размером 35×75×5 мм (для определения адгезии и скорости отверждения).

Древесные образцы предварительно обрабатывали абразивом зернистостью Р120 для удаления ворса и создания однородного микрорельефа на поверхности. Влажность древесины перед нанесением покрытия составляла 10±2 %.

Металлические и стеклянные пластины подвергали тщательному обезжириванию ацетоном «ГОСТ 2768-84» для удаления загрязнений и обеспечения равномерной смачиваемости подложек.

Нанесение лакокрасочных составов проводили с помощью лабораторного аппликатора с регулируемым зазором, обеспечивающим равномерное покрытие всей поверхности. Толщина мокрого слоя составляла 150 и 300 мкм.

Для каждого исследуемого состава, каждого типа подложки и каждой толщины покрытия было подготовлено 10 образцов, что обеспечило необходимую статистическую достоверность результатов.

Сформированные покрытия отверждали в естественных условиях при (20±2) °С (комнатная температура) и влажности (60±5) %. Такой режим был выбран для обеспечения кинетики отверждения, характерной для алкидно-уретановых покрытий в условиях, приближённых к реальным параметрам работы.

Перед физико-механическими испытаниями образцы дополнительно выдерживали в течение 7 суток при комнатной температуре для стабилизации структуры покрытия и релаксации внутренних напряжений.

Время высыхания до степени 1 и 3 определяли по ГОСТ 19007-2023 на подложках из стекла, сосны и дуба при нормируемом расходе 150 и 300 мкм. Фиксацию степени высыхания проводили через равные промежутки времени до достижения требуемого значения.

Прочность при ударе оценивали по ГОСТ 4765-2024 на приборе У1а для покрытий, сформированных на металлических пластинах с расходом 150 и 300 мкм. Результат выражали в сантиметрах, при которых не наблюдалось разрушения покрытия.

Эластичность при изгибе определяли по ГОСТ 31974-2012 на металлических пластинах; оценку проводили по минимальному диаметру стержня, при котором не появлялись трещины.

Адгезию покрытий к древесным подложкам (сосна, дуб) в сухом состоянии измеряли методом решётчатых надрезов по ГОСТ 31149-2014. Результат выражали в баллах (0 – наилучшая адгезия, 5 – наихудшая).

Адгезию после статического воздействия воды («адгезия по мокрому») определяли для оценки прочности лакокрасочного покрытия на древесном основании после воздействия воды, моделирующему условия атмосферных осадков (дождя). Образцы древесины сосны и дуба со сформированными покрытиями (расход 150 мкм) полностью погружали в дистиллированную воду и выдерживали при комнатной температуре в течение 24 ч. После извлечения образцы кондиционировали при температуре (20±2) °С и относительной влажности воздуха 65±5 % в течение 2 ч для удаления поверхностной влаги. Адгезию оценивали методом решётчатых надрезов по ГОСТ 31149-2014. Результат выражали в баллах по (0 – наилучшая адгезия, 5 – наихудшая).

Статистическая обработка данных. Каждый эксперимент повторяли не менее 10 раз, общее количество наблюдений составило 2370. Статистическая обработка результатов включала расчёт среднего арифметического значения (Y), среднеквадратичного отклонения (S), коэффициента вариации (V) и доверительных интервалов при уровне-значимости α = 0,95. Расчёты выполнялись с использованием встроенных функций табличного процессора (Microsoft Excel) [15]. Статистическое тестирование подтвердило достоверность и воспроизводимость полученных результатов.

Результаты исследования представлены в табл. 1 и 3 и на рис. 1–5. В табл. 2 приведены уравнения регрессии, описывающие влияние модификаторов на продолжительность отверждения ЛКМ. На рис. 6–9 результаты исследований физико-механических свойств ЛКМ представлены графически в процентах относительно контрольного образца без модификатора.

Таблица 1. Влияние типа и количества углеродных наноматериалов на время высыхания алкидно-уретановых покрытий до степени 1 и 3

Вид модификатора	Кол-во модификатора в %.	Высыхание до степени 1 – ГОСТ 19007-2023					Высыхание до степени 3 – ГОСТ 19007-2023				
		вид подложки					вид подложки				
		Стеклянная пластина (расход 150 мкм), мин	Тест пластина № 1 (расход 150 мкм), мин	Тест пластина № 2 (расход 300 мкм), мин	Сосна (расход 150 мкм), мин	Дуб (расход 150 мкм), мин	Стеклянная пластина (расход 150 мкм), мин	Тест пластина № 1 (расход 150 мкм), мин	Тест пластина № 2 (расход 300 мкм), мин	Сосна (расход 150 мкм), мин	Дуб (расход 150 мкм), мин
нет	0	35,9	35,6	38,7	30,3	31,6	90,0	89,5	180,0	76,0	80,0
Графен	0,005	31,4	31,6	34,3	27,2	27,5	91,0	89,0	171,0	76,5	79,5
Графен	0,01	36,3	36,6	42,8	30,4	32,1	104,0	103,0	226,0	83,0	88,0
Графен	0,05	40,0	41,6	42,8	34,2	35,9	114,0	115,0	250,0	95,0	100,0
АШ	0,005	19,3	19,1	20,6	15,1	16,6	56,0	55,0	110,0	46,0	51,0
АШ	0,01	16,4	15,9	18,4	13,3	14,0	44,0	44,0	74,0	35,0	38,0
АШ	0,05	19,8	19,9	21,3	15,7	16,4	65,0	63,0	112,0	49,0	54,0
Графит	0,005	36,0	35,9	38,8	30,7	32,0	93,0	89,0	181,0	80,0	83,0
Графит	0,01	36,2	36,1	39,2	30,9	32,2	94,0	89,0	181,0	79,0	84,0
Графит	0,05	37,6	37,8	40,2	32,1	33,6	105,0	104,0	207,0	88,0	90,0
С60	0,005	18,6	18,4	19,4	15,4	15,6	54,0	54,0	108,0	45,0	48,0
С60	0,01	14,6	14,3	17,1	7,7	10,5	42,0	36,0	64,0	32,0	33,0
С60	0,05	15,2	14,9	18,5	14,9	15,9	59,0	61,0	112,0	47,0	52,0

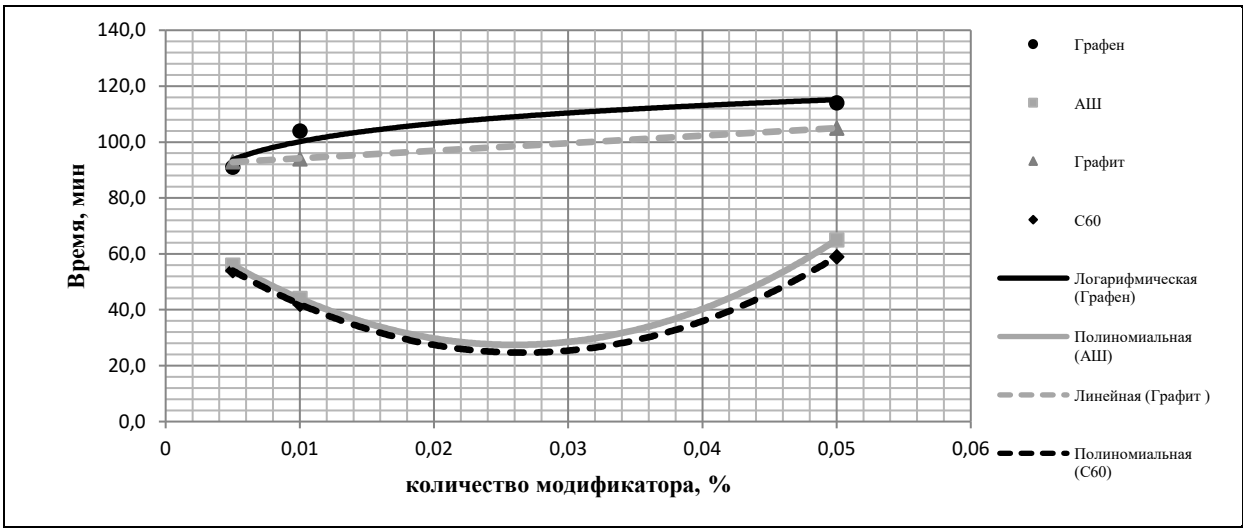


Рис. 1. График зависимости времени отверждения до 3 степени от количества модификатора на подложке из стекла

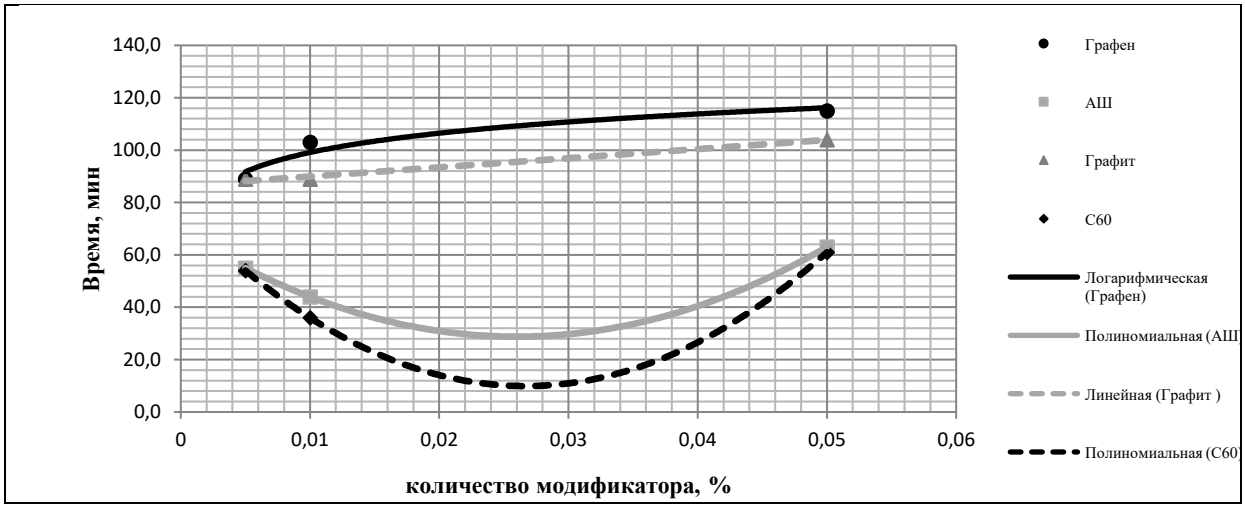


Рис. 2. График зависимости времени отверждения до 3 степени от количества модификатора на тест пластине № 1 при расходе 150 мкм

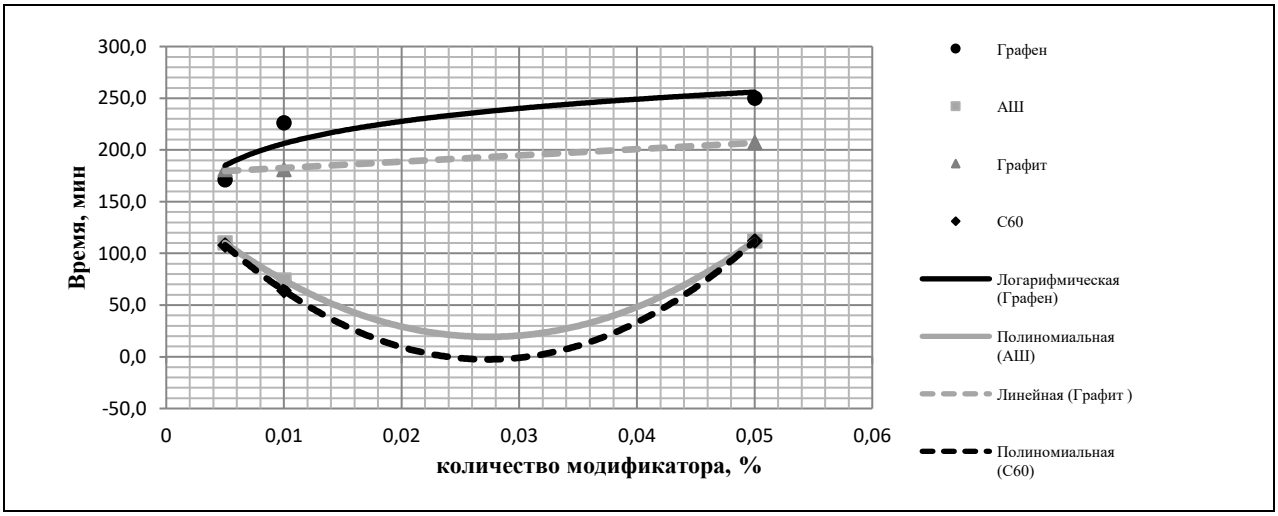


Рис. 3. График зависимости времени отверждения до 3-й степени от количества модификатора на тест пластине № 2 при расходе 300 мкм

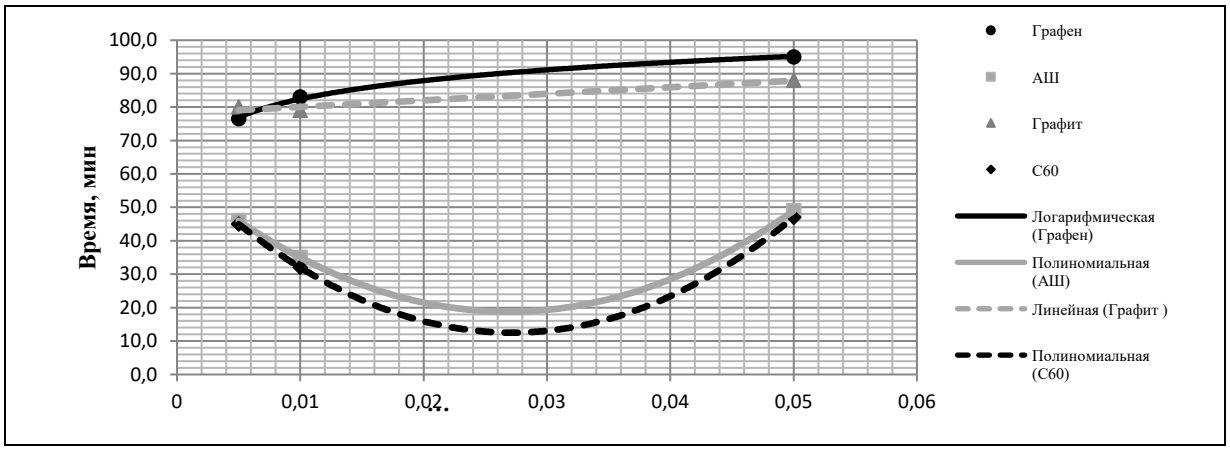


Рис. 4. График зависимости скорости отверждения до 3-й степени от количества модификатора на подложке из сосны при расходе 150 мкм

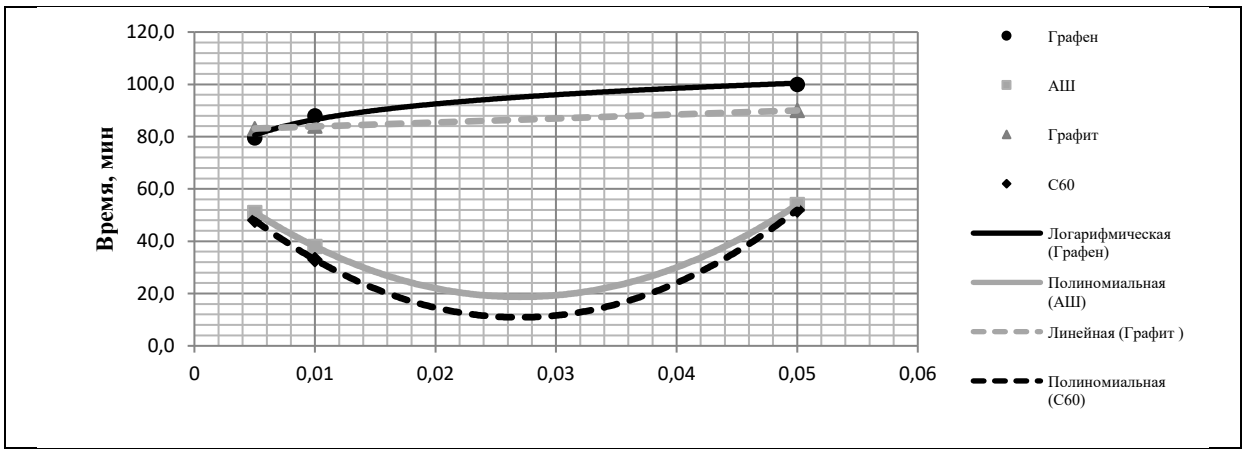


Рис. 5. График зависимости времени отверждения до 3-й степени от количества модификатора на подложке из дуба при расходе 150 мкм

Таблица 2. Уравнения кинетики отверждения алкидно-уретановых покрытий, модифицированных углеродными наночастицами

Подложка	Графен		АШ		Графит		С60	
	уравнение регрессии	R^2	уравнение регрессии	R^2	уравнение регрессии	R^2	уравнение регрессии	R^2
Стеклянная пластина (расход 150 мкм), мин	$y = 9{,}323\ln(x) + 143$	0,91	$y = 65000x^2 - 3375x + 71{,}25$	0,99	$y = 269{,}8x + 91{,}48$	0,99	$y = 62778x^2 - 3341x + 69{,}13$	0,99
Тест пластина № 1 (расход 150 мкм), мин	$y = 10{,}61\ln(x) + 147{,}9$	0,93	$y = 59444x^2 - 3091x + 68{,}97$	0,98	$y = 349{,}3x + 86{,}43$	0,98	$y = 93889x^2 - 5008x + 76{,}69$	0,98
Тест пластина № 2 (расход 300 мкм), мин	$y = 30{,}89\ln(x) + 348{,}5$	0,81	$y = 18111x^2 - 9916x + 155{,}0$	0,99	$y = 605{,}4x + 176{,}5$	0,98	$y = 22222x^2 - 12133x + 163{,}1$	0,97
Сосна (расход 150 мкм), мин	$y = 7{,}932\ln(x) + 118{,}9$	0,99	$y = 56667x^2 - 3050x + 59{,}83$	0,97	$y = 195{,}8x + 78{,}08$	0,95	$y = 66111x^2 - 3591x + 61{,}30$	0,99
Дуб (расход 150 мкм), мин	$y = 8{,}648\ln(x) + 126{,}3$	0,98	$y = 66667x^2 - 3600x + 67{,}33$	0,99	$y = 153{,}4x + 82{,}34$	0,99	$y = 77222x^2 - 4158x + 66{,}86$	0,98

По данным табл. 1 и уравнений регрессии (табл. 2), введение фуллерена C_{60} и алмазной шихты (АШ) в концентрации 0,010 % приводит к минимальному времени высыхания до степени 3 на всех исследованных подложках (стекло, металл, сосна, дуб). Для сосны время сокращается с 76,0 мин у контрольного образца до 32,0 мин (C_{60}) и до 35,0 мин (АШ); для дуба – с 80,0 мин до 33,0 мин (С60) и до 38,0 мин (АШ). При увеличении концентрации до 0,050 % время высыхания возрастает, что фиксируется как для фуллерена C_{60}, так и для алмазной шихты. Для этих двух модификаторов зависимость времени высыхания от концентрации описывается квадратичными уравнениями, это означает, что существует определённая концентрация, вблизи 0,010 %, при которой время высыхания наименьшее, а отклонение в сторону увеличения или уменьшения концентрации приводит к росту времени. Для графена зависимости описываются логарифмическими уравнениями, для нанографита – линейными; в обоих случаях время высыхания монотонно возрастает с увеличением концентрации [15]. Построенные регрессионные уравнения предполагается в дальнейшем использовать для оптимизации технологического режима отверждения. В исследованных концентрациях (0,005–0,050 %) графен и нанографит не обеспечивают ускорения отверждения: время высыхания при их введении равно или превышает контрольные значения. Сравнение тест-пластин с разной толщиной слоя, 150 и 300 мкм, показывает, что при увеличении толщины различия между модификаторами становятся более выраженными. Количественные значения времени отверждения для дуба несколько выше, чем для сосны, при одинаковых условиях.

Таблица 3. Физико-механические свойства алкидно-уретановых покрытий, модифицированных углеродными наноматериалами

Вид мод.	Количество модификатора, %	Адгезия		Адгезия по «мокрому»		Прочности лакокрасочного покрытия на изгиб («Эластичность»)		Прочности при ударе	
		вид подложки							
		Сосна (расход 150 мкм), балл	дуб (расход 150 мкм), балл	Сосна (расход 150 мкм.), балл	дуб (расход 150 мкм, балл	расход 150 мкм, см	расход 300 мкм, см	расход 150 мкм, см	расход 300 мкм, см
АУ	0	1	2	3	4	5	10	15	10
Графен	0,005	1	2	2	4	1	3	15	10
	0,01	1	2	2	4	3	5	15	10
	0,05	1	2	3	5	3	5	5	5
АШ	0,005	0	1	1	2	0	1	45	30
	0,01	0	0	1	1	0	0	45	40
	0,05	0	0	1	1	0	1	50	40
Графит	0,005	1	2	1	3	10	20	15	5
	0,01	1	1	3	3	10	20	10	5
	0,05	2	2	2	3	10	20	5	5
С60	0,005	0	1	1	1	0	3	45	40
	0,01	0	0	0	0	0	3	50	40
	0,05	0	0	1	1	1	5	45	35

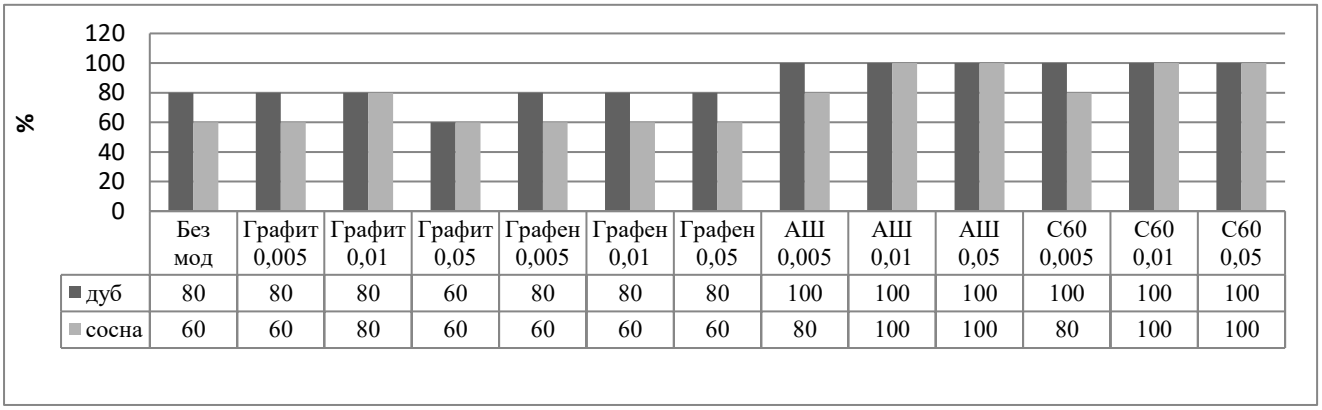
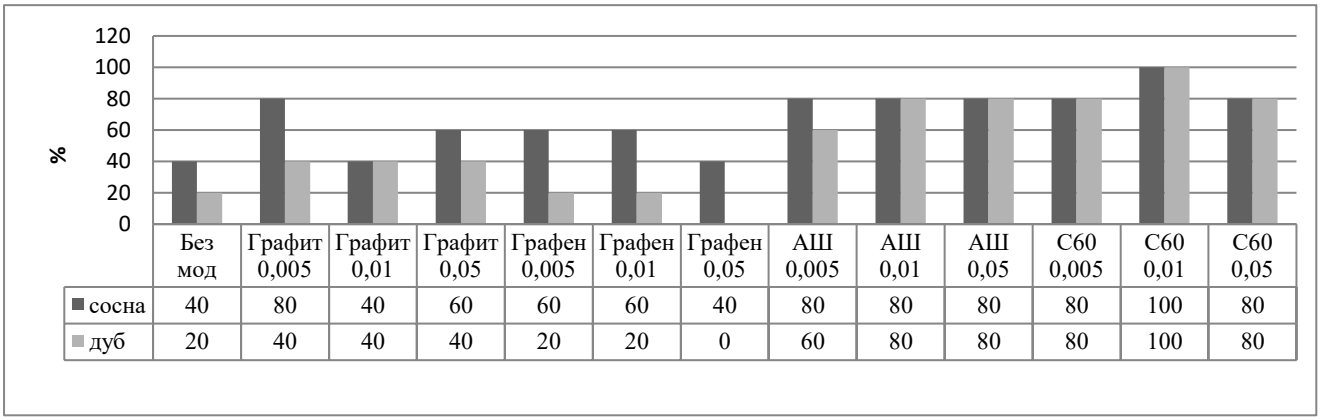
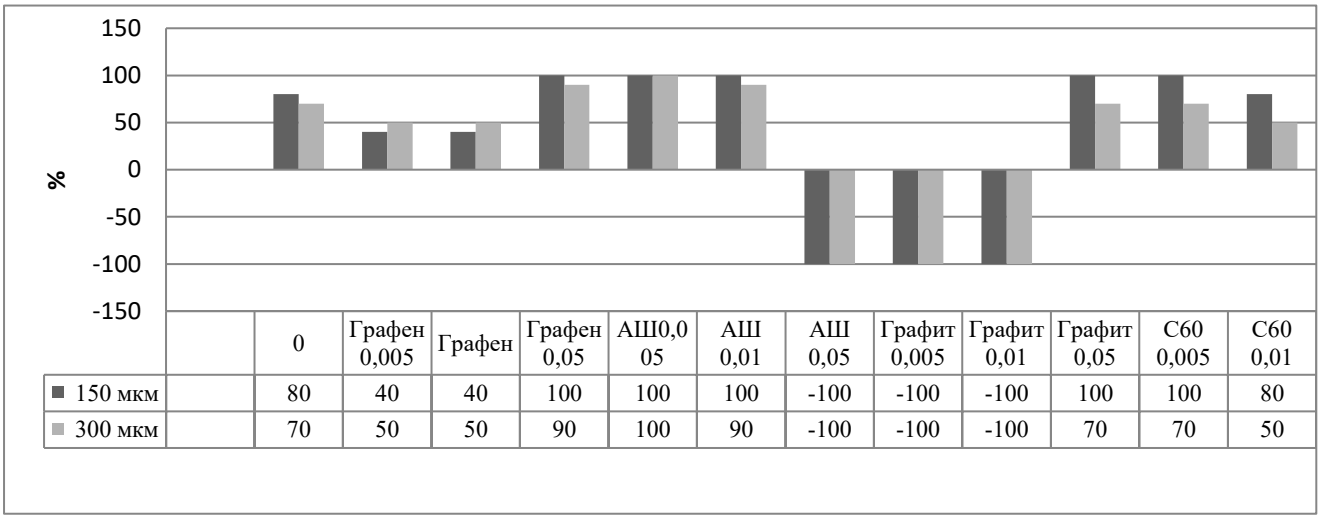


Рис. 6. Диаграмма зависимости адгезионных свойств модифицированных алкидно-уретановых покрытий к древесине сосны и дуба (относительно контрольного образца, %)



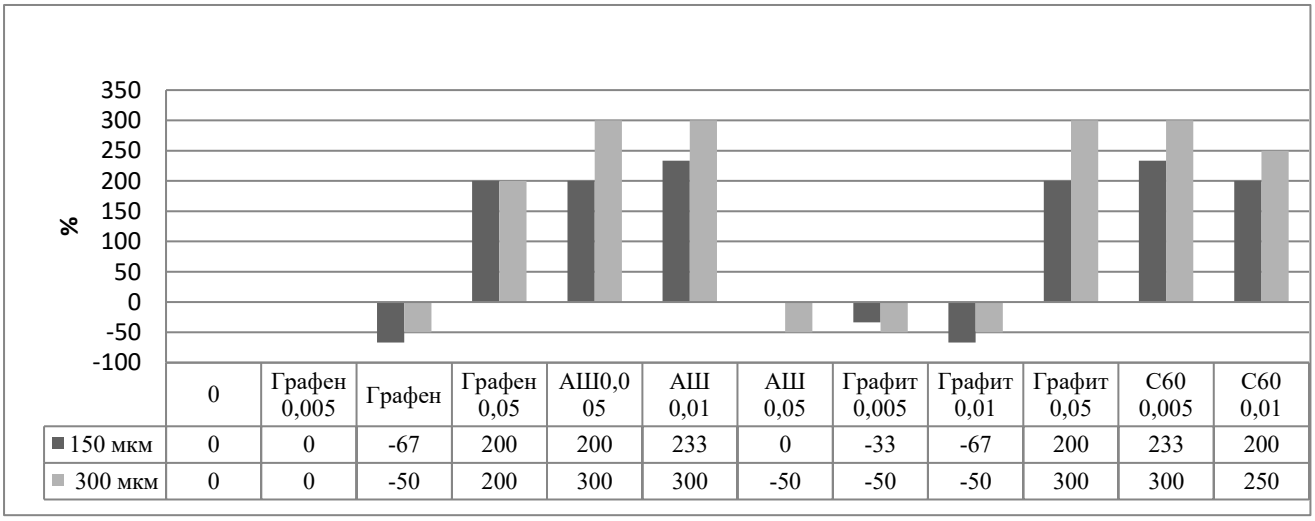
	Без мод	Графит 0,005	Графит 0,01	Графит 0,05	Графен 0,005	Графен 0,01	Графен 0,05	АШ 0,005	АШ 0,01	АШ 0,05	С60 0,005	С60 0,01	С60 0,05
сосна	40	80	40	60	60	60	40	80	80	80	80	100	80
дуб	20	40	40	40	20	20	0	60	80	80	80	100	80

Рис. 7. Диаграмма зависимости адгезионных свойств модифицированных алкидно-уретановых покрытий после статического воздействия воды к древесине сосны и дуба (относительно контрольного образца, %)



		0	Графен 0,005	Графен	Графен 0,05	АШ0,005	АШ 0,01	АШ 0,05	Графит 0,005	Графит 0,01	Графит 0,05	С60 0,005	С60 0,01
150 мкм		80	40	40	100	100	100	-100	-100	-100	100	100	80
300 мкм		70	50	50	90	100	90	-100	-100	-100	70	70	50

Рис. 8. Диаграмма зависимости эластичности при изгибе модифицированных алкидно-уретановых покрытий (относительно контрольного образца, %)



	0	Графен 0,005	Графен	Графен 0,05	АШ0,005	АШ 0,01	АШ 0,05	Графит 0,005	Графит 0,01	Графит 0,05	С60 0,005	С60 0,01
150 мкм	0	0	-67	200	200	233	0	-33	-67	200	233	200
300 мкм	0	0	-50	200	300	300	-50	-50	-50	300	300	250

Рис. 9. Диаграмма зависимости ударной прочности модифицированных алкидно-уретановых покрытий (относительно контрольного образца, %)

В сухом состоянии немодифицированное покрытие имеет адгезию 1 балл к сосне и 2 балла к дубу. Модификация фуллереном C_{60} и алмазной шихтой позволяет достичь наилучших показателей: при 0,005 % C_{60} адгезия к обеим породам увеличивается до 0 баллов, а при 0,010 % она остаётся на нулевом уровне (адгезия 100 %) даже после статического воздействия воды (рис. 6, 7). Для АШ аналогичные результаты были получены в диапазоне 0,010–0,050 %. Графен и нанографит не обеспечивают улучшения: адгезия после смачивания

достигает 4–5 баллов, что сопоставимо с контрольным образцом без модификатора или хуже. Увеличение прочности сцепления при использовании C_{60} и АШ объясняется способностью этих наночастиц проникать в микронеровности древесины и формировать более плотную пространственную сеть полимера [8, 11].

Контрольный образец без модификатора при нанесении слоём 150 мкм выдерживает изгиб на стержне диаметром 5 мм, тогда как при нанесении слоём 300 мкм оно выдерживает изгиб на стержне диаметром 10 мм. Введение фуллерена C_{60} и алмазной шихты (АШ) в концентрациях 0,005–0,010 % позволяет получить покрытия, которые не растрескиваются даже на стержне минимального диаметра (1 мм). Для графена и нанографита наблюдается снижение эластичности, и эта зависимость ухудшается с увеличением толщины покрытия. При нанесении слоём 150 мкм покрытие, модифицированное 0,050 % графена, разрушается на стержне диаметром 30 мм, а при нанесении слоём 300 мкм – на стержне диаметром 50 мм. Для нанографита при той же концентрации значения составляют 100 мм и 200 мм соответственно, что указывает на крайне низкую эластичность. Таким образом, увеличение толщины слоя усугубляет негативное влияние пластинчатых модификаторов на деформационные свойства. Сферическая форма C_{60} и высокая дисперсность АШ способствуют равномерному распределению наполнителя без образования концентраторов напряжений, что обеспечивает высокую эластичность даже в толстых покрытиях [2, 4]. Ударная вязкость контрольного образца при толщине покрытия 150 мкм составляет 15 см. При добавлении АШ и C_{60} это значение увеличивается до 45–50 см (рис. 9), что в 3–3,5 раза выше, чем у контрольного образца. Для графена и нанографита наблюдается снижение ударной вязкости, особенно при увеличении толщины покрытия до 300 мкм, где значение падает до 5 см. Увеличение ударной вязкости при использовании C_{60} и АШ коррелирует с увеличением эластичности и адгезии, что косвенно указывает на формирование более однородной структуры, способной эффективно рассеивать механическую энергию.

Заключение. Полученные данные подтверждают решающую роль геометрии наночастиц и химии поверхности в формировании структуры полимерных композитов [2, 3].

Практическая значимость работы заключается в возможности создания композиций с улучшенными эксплуатационными характеристиками при значительном сокращении временных затрат. Учитывая минимально малые количества вводимых добавок, предлагаемая модификация экономически оправдана.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются оценка долговременной атмосферостойкости разработанных покрытий на древесине, изучение их стойкости к агрессивным средам и оптимизация составов для промышленного применения. В то же время наиболее перспективными модификаторами для углубленного изучения являются фуллерен C_{60} и алмазная шихта, которые в концентрации 0,010 % обеспечивают максимальное улучшение комплекса свойств. Подводя итог полученным результатам, можно отметить, что именно эти модификаторы, благодаря своей сферической (C_{60}) и высокодисперсной (АШ) морфологии, позволяют направленно регулировать свойства покрытий. Установленные закономерности создают научную основу для разработки импортозамещающих лакокрасочных систем с прогнозируемыми эксплуатационными характеристиками на древесных подложках.

Литература

1. Белова О.А., Коваленко И.В., Чубинский А.Н. Стабилизация растворов углеродных наноматериалов для модификации лакокрасочных материалов для защитно-декоративной отделки древесины. Журнал «Деревообрабатывающая промышленность» номер 3 за 2025 год. ISSN 0011-9008
2. Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Шель Н.В., Осетров А.Ю., Зверева А.А. Углеродные наноматериалы и композиты на их основе // Вестник российских университетов. Математика. 2013. № 4–1. https://cyberleninka.ru/article/n/uglerodnye-nanomaterialy-i-kompozity-na-ih-osnove
3. Гераськин Ю.М., Городиский К.В. (2025). Современные тенденции импортозамещения строительных материалов и оборудования в Российской Федерации. Недвижимость: экономика, управление, (1), С. 54–58. https://doi.org/10.22337/2073-8412-2025-1-54-58
4. Глоба А.И., Прокопчук Н.Р., Лаптик И.О., Санкович Н.Л., Духович Ю.В. Модификация двухкомпонентных лакокрасочных материалов углеродными наноматериалами // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. Минск: БГТУ, 2018. № 2 (211). С. 91–98 с.
5. Жуков Е.В., Онегин В.И. Технология Защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов. СПб.: Изд-во «Экология», 1993. 302 с.
6. Клинов Б.Н., Штыков С.Н., Горин Д.А., Иноземцев О.А., Ященок А.М., Колинников Т.А. Физико-химия наноструктурированных материалов. Саратов: Изд-во СГУ, 2009. 217 с.
7. Микитаев А.К., Козлов Г.В. Структурная модель усиления нанокомпозитов полиметилметакрилат/углеродные нанотрубки при ультрамалых содержа-ниях нанонаполнителя // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, № 10. С. 99–103.
8. Николайчик А.В. Выбор оптимального способа введения углеродных наноматериалов в органорастворимые лакокрасочные материалы / А.В. Николайчик, Н.Р. Прокопчук // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия и технология органических веществ. 2009. Вып. XVII. С. 68–71.
9. Образцова Н.А. Формирование новых гибридных структур фуллерена С60 на основе амфифильных сополимеров N-винилпирролидона с (ди)метакрилатами в различных средах: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.06 / Институт проблем химической физики РАН. Черноголовка, 2016. 212 с.
10. Павлюкова А.В. Деревянное домостроение как фактор стабилизации лесопромышленной отрасли в условиях сокращения экспорта / А.В. Павлюкова // Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. 2024. Т. 34, вып. 5. С. 833–839.
11. Прокопчук Н.Р. Химическая модификация пленкообразующих веществ : учеб. пособие для студентов специальности «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий» / Н.Р. Прокопчук, Э.Т. Крутько, А.И. Глоба. Минск : БГТУ, 2012. 381 с.

12. Степанов С.В. Сравнительные экспериментальные исследования лакокрасочных покрытий корпусов судов в связи с уходом с российского рынка иностранных производителей / С.В. Степанов // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 87, ч. 3. С. 95–98. https://doicode.ru/doifile/lj/88/trnio-08-2022-165.pdf
13. Цой Ю.И. Исследование физико-химических свойств уретано-алкидных лакокрасочных материалов / Ю.И. Цой, А.К. Блинов // Раздел XXXV. Ресурсосбережение : материалы конференции. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургская Государственная художественно-промышленная академия им. А.Л. Штиглица, 2021. С. 1–4. https://doicode.ru/doifile/lj/79/trnio-11-2021-280.pdf
14. Чернышова О.Д., Парамонова Е.А. Импортозамещение в современной России: проблемы и перспективы / О.Д. Чернышова, Е.А. Парамонова // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 95, ч. 2. С. 58–62. https://doicode.ru/doifile/lj/94/trnio-02-2023-181.pdf
15. Чубинский А.Н., Русаков Д.С. Батырева И.М., Варанкина Г.С. Методы и средства научных исследований. Методы планирования и обработки результатов экспериментов : учеб. пособие / А.Н. Чубинский. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2018. С. 104.

References

1. Belova O.A., Kovalenko I.V., Chubinsky A.N. Stabilization of solutions of carbon nanomaterials for modifying paint-and-varnish materials for protective and decorative finishing of wood. *Journal "Woodworking Industry"*, Issue 3, 2025, ISSN 0011-9008.
2. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Shel N.V., Osetrov A.Yu., Zvereva A.A. Carbon nanomaterials and composites based on them // Bulletin of Russian Universities. Mathematics. 2013. No. 4–1.
3. Geraskin Yu.M., Gorodisky K.V. (2025). Modern trends of import substitution of construction materials and equipment in the Russian Federation. Real Estate: Economics, Management, (1), pp. 54–58.
4. Globa A.I., Prokopchuk N.R., Laptik I.O., Sankovich N.L., DukhovichYu.V. Modification of two-component paint-and-varnish materials with carbon nanomaterials // Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geoecology. Minsk: BSTU, 2018. No. 2 (211). pp. 91–98.
5. Zhukov E.V., Onegin V.I. Technology of Protective-Decorative Coatings for Wood and Wood-Based Materials. St. Petersburg: Ekologiya Publishing House, 1993. 302 p.
6. Klinov B.N., Shtykov S.N., Gorin D.A., Inozemtsev O.A., Yashchenok A.M., Kolinnikov T.A. Physical Chemistry of Nanostructured Materials. Saratov: Saratov State University Publishing House, 2009. 217 p.
7. Mikitaev A.K., Kozlov G.V. Structural model of reinforcement of polymethyl methacrylate/carbon nanotube nanocomposites at ultra-low contents of nanofiller // Journal of Technical Physics. 2016. Vol. 86, No. 10. pp. 99–103.
8. Nikolaychik A.V., Prokopchuk N.R. Selection of the optimal method for introducing carbon nanomaterials into solvent-borne paint-and-varnish materials / A.V. Nikolaychik, N.R. Prokopchuk // Proceedings of BSTU. Ser. IV, Chemistry and Technology of Organic Substances. 2009. Iss. XVII. pp. 68–71.
9. Obraztsova N.A. Formation of new hybrid structures of fullerene C60 based on amphiphilic copolymers of N-vinylpyrrolidone with (di)methacrylates in various media: diss. ... Cand. of Chemical Sciences: 02.00.06 / Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences. Chernogolovka, 2016. 212 p.
10. Pavlyukova A.V. Wooden house construction as a factor in stabilizing the forest industry under export reduction conditions / A.V. Pavlyukova // Bulletin of Udmurt University. Economics and Law Series. 2024. Vol. 34, iss. 5. pp. 833–839.
11. Prokopchuk N.R., Krutko E.T., Globa A.I. Chemical Modification of Film-Forming Substances: textbook for students of the specialty "Chemical Technology of Organic Substances, Materials and Products". Minsk : BSTU, 2012. 381 p.
12. Stepanov S.V. Comparative experimental studies of paint coatings on ship hulls in connection with the departure of foreign manufacturers from the Russian market / S.V. Stepanov // Trends in the Development of Science and Education. 2022. No. 87, part 3. pp. 95–98.
13. Tsoi Yu.I., Blinov A.K. Investigation of the physicochemical properties of urethane-alkyl paint-and-varnish materials / Yu.I. Tsoi, A.K. Blinov // Section XXXV. Resource saving: conference proceedings. St. Petersburg : St. Petersburg State Academy of Art and Industry named after A.L. Stieglitz, 2021. pp. 1–4.
14. Chernyshova O.D., Paramonova E.A. Import substitution in modern Russia: problems and prospects / O.D. Chernyshova, E.A. Paramonova // Trends in the Development of Science and Education. 2023. No. 95, part 2. pp. 58–62.
15. Chubinsky A.N., Rusakov D.S., Batyreva I.M., Varankina G.S. Methods and Means of Scientific Research. Methods of Planning and Processing Experimental Results: textbook. St. Petersburg : St. Petersburg State Forest Technical University, 2018. 104 p.