

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-100-116

¹Буковцова А.И., ^{1,*}Нецвет Д.Д., ²Жерновская И.В.¹Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
*E-mail: netsvet_dd@mail.ru

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ САМООЧИЩЕНИЯ В МАТЕРИАЛАХ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Аннотация. В настоящее время существует потребность в возведении зданий с высокими показателями по долговечности и эксплуатационными свойствами, которая может быть реализована разработкой и внедрением самоочищающихся покрытий и материалов с их применением. Использование строительных материалов с самоочищающейся поверхностью является экономичным и экологичным решением для поддержания внешнего вида и чистоты фасадов зданий, а также значительного повышения долговечности строительных конструкций, в связи с чем данное направление является актуальным для строительной отрасли.

В статье представлен обзор работ по разработке и исследованию самоочищающихся покрытий с гидрофобными и гидрофильными свойствами. Указаны основные показатели, которые контролируются для самоочищающихся покрытий. Также рассмотрены «умные» покрытия, свойства которых меняются в зависимости от воздействующих факторов внешней среды.

Существует два основных типа самоочищающихся поверхностей: гидрофобные и гидрофильные. Гидрофобные поверхности характеризуются высокой водоотталкивающей способностью, которая достигается благодаря наличию микро- и наноструктур. Гидрофильные поверхности, наоборот, обладают способностью притягивать воду. Требуемые свойства поверхности и условия эксплуатации материала определяют выбор соответствующего типа покрытия и технологии нанесения. Однако, в настоящее время ученые ведут разработки амфиобных и амфифильных материалов, свойства которых распространяются одновременно на полярные и неполярные жидкости, что позволяет достигать более высоких эксплуатационных показателей покрытий и эффективности их применения.

Литературный поиск производился по опубликованным за последние 5 лет статьям, рецензированным в базах данных РИНЦ, Scopus и Web of Science.

Ключевые слова: самоочищение, гидрофобные покрытия, гидрофильные покрытия, шероховатость, поверхностная энергия

Введение. В природе существует значительное количество примеров поверхностей со свойствами самоочищения и гидрофобности: поверхность листьев растений (лотос, роза), кожа ящериц, крылья насекомых и т.д. Основываясь на результатах исследований особенностей поверхности данных объектов, учеными разработаны инновационные технологии и материалы для получения покрытий с заданными свойствами и контроля смачиваемости.

Вопросы разработки и внедрения материалов с самоочищающимися поверхностями в настоящее время получают всё больше внимания как со стороны науки о материалах, так и со стороны различных отраслей промышленности. Данная проблематика является важной и для строительной отрасли, одной из задач которой является возведение гражданских и промышленных зданий с высокими показателями по долговечности, энергоэффективности, улучшенными эстетическими и эксплуатационными характеристиками. Также важно отметить, что применение

самоочищающихся покрытий является экономичным и экологичным (с низким углеродным следом) решением для поддержания внешнего вида фасадов зданий: снижение эксплуатационных затрат достигается путем уменьшения частоты уборки, сокращения количества используемых для очистки моющих средств и воды, а также деструктивного влияния от воздействия агрессивных химических веществ при обработке, что позволит продлить срок службы материалов и сохранить их внешний вид. В итоге эффект самоочищения приведет к снижению выбросов углекислого газа при производстве и эксплуатации новых материалов и выполнении работ по очистке и уборке, сокращению загрязнения окружающей среды и экономии ресурсов [1–5].

Поиск и анализ опубликованных за последние 5 лет статей в базах данных РИНЦ, Scopus и Web of Science показывает высокий интерес исследователей в области самоочищающихся покрытий.

Таким образом, цель представленного исследования заключалась в изучении и анализе современных самоочищающихся покрытий для материалов различного назначения, в том числе и строительных материалов для облицовки фасадов зданий и остекления, применение которых позволит значительно повысить долговечность и эксплуатационные свойства зданий. Особое внимание уделяется созданию гидрофобных, гидрофильных, амфифобных и «умных» покрытий, свойства которых меняются в зависимости от внешних факторов. Исследование направлено на выявление преимуществ и особенностей применения данных покрытий для улучшения эстетических характеристик, снижения эксплуатационных затрат и воздействия на окружающую среду, что делает их актуальными для строительной отрасли.

Методология. Поиск по базе данных РИНЦ осуществлялся с помощью сайта ELIBRARY.RU, поиск зарубежных статей проводился с помощью сайтов ScienceDirect.com, ResearchGate.net, scholar.google.ru. Наиболее полная информация о результатах, опубликованных в зарубежных источниках, получена с сайта ScienceDirect.com.

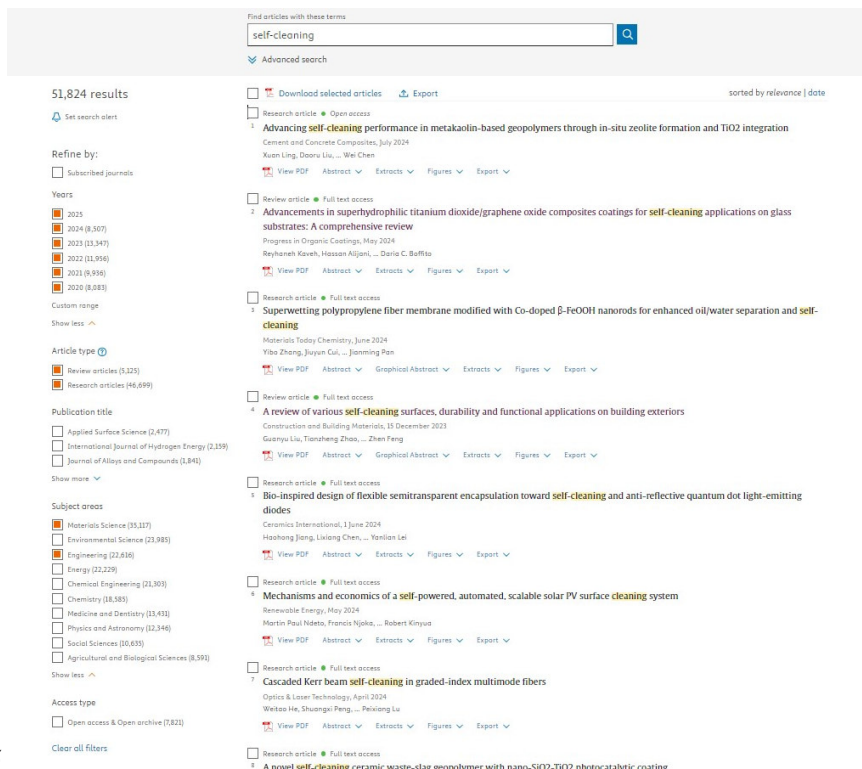
Согласно полученным данным, с 2020 по 2024 г. по тематике «самоочищающиеся» на сайте ELIBRARY.ru опубликована и запланирована к публикации 51 статья, по тематике «self-cleaning» на сайте ScienceDirect.com – 51824 статьи (рис. 1). Отметим, что реальное количество статей может незначительно отличаться от представленного на сайте ввиду различий во времени рецензирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКОВОГО ЗАПРОСА

ВСЕГО НАЙДЕНО ПУБЛИКАЦИЙ: 51 из 55631787

№	Публикация	Цит.
1	ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ ЗОЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ Коробова Е.Д., Брусевич А., Дашенко Н.В. Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2022. № 3. С. 30-35.	0
2	САМООЧИЩАЮЩИЕСЯ НАНОРАЗМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ Ерзунов К.А., Одинцова О.И., Трегубов А.В., Ипличева М.Д. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 5 (401). С. 5-18.	1
3	ПОЛУЧЕНИЕ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ КОМПОЗИТОВ ШЕРСТЯНОЕ ВОЛОКНО – TiO₂-ПИЛЛАРНЫЙ МОНТОРИЛЛОНИТ С УФ-ПРОТЕКТНЫМИ СВОЙСТВАМИ Овчинников Н.Л., Владимирцева Е.Л., Быков Ф.А., Изюмова О.С., Бутман М.Ф. Физикохимия поверхности и защита материалов. 2023. Т. 59. № 3. С. 298-304.	2
4	ОЦЕНКА САМООЧИЩАЮЩЕЙСЯ СПОСОБНОСТИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ Гречищева Н.Ю., Запорожская А.А., Алтанбагана Н. Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2023. Т. 66. № 10. С. 114-120.	0
5	НАНОРАЗМЕРНЫЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ ДОБАВКИ ДЛЯ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ БЕТОНОВ Тюкавкина В.В., Цырятьева А.В. Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2023. № 20. С. 468-476.	0
6	ОЦЕНКА ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ ЗОЛЕЙ В СОСТАВЕ САМООЧИЩАЮЩЕГОСЯ ПОКРЫТИЯ Коробова Е.Д., Дашенко Н.В. Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоёмкие технологии и материалы (SMARTEX). 2023. № 1. С. 119-125.	0
7	ОПРЕДЕЛЕНИЕ САМООЧИЩАЮЩЕЙСЯ СПОСОБНОСТИ БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ TiO₂-SiO₂ Цырятьева А.В., Тюкавкина В.В. Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14. № 5. С. 84-89.	0
8	СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ Балыков А.С., Володин С.В. В сборнике: Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2023. Сборник научных статей 12-й Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах. Курск, 2023. С. 202-206.	0
9	ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ ДОБАВКИ ДЛЯ САМООЧИЩАЮЩИХСЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ Плесовских В.П., Кийко П.И., Черных Т.Н. В сборнике: Инновации в строительстве. Технологии КНАУФ. Материалы 15-й Международной научно-практической конференции. Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет) Архитектурно-строительный институт Консультационный центр КНАУФ ООО «КНАУФ ГИПС ЧЕЛЯБИНСК» Уральская сбытовая дирекция – ф-л ООО «КНАУФ ГИПС» (г. Челябинск). 2022. С. 97-103.	0
10	ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ САМООЧИЩАЮЩЕЙСЯ СПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ Кийко П.И., Черных Т.Н. В сборнике: Инновации в строительстве. Технологии КНАУФ. Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции. Челябинск, 2023. С. 57-61.	0
11	САМООЧИЩАЮЩИЙСЯ ФИЛЬТР УСТАНОВОК ДЛЯ СКВАЖИННОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ Шишляников Д.И., Коротков Ю.Г., Дремина Д.И. Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. 2022. Т. 1. С. 117-121.	0
12	УФ-ИНДУЦИРОВАННАЯ САМООЧИЩАЮЩАЯСЯ МЕМБРАНА, СОДЕРЖАЩАЯ TiO₂ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ЭМУЛЬСИИ НЕФТЬ / ВОДА Вежновец В.К., Курлович Д.Э. Вестник магистратуры. 2020. № 1-1 (100). С. 20-21.	1
13	САМООЧИЩАЮЩИЕСЯ ФАСАДНЫЕ ПОКРЫТИЯ Лаврова А., Мещеряков Э.С., Фомин А., Павловы М.П.	

Рис. 1. Поиск статей по тематике «самоочищающиеся» и «self-cleaning» на сайтах ELIBRARY.ru (а) и ScienceDirect.com (б) (начало)



б
Рис. 1. Поиск статей по тематике «самоочищающиеся» и «self-cleaning» на сайтах ELIBRARY.ru (а) и ScienceDirect.com (б) (окончание)

Поиск ключевых слов по однокоренным терминам, связанным со свойствами самоочистки, позволил получить следующие результаты (рис. 2).

Как видно, наиболее часто встречаются статьи, посвященные гидрофобным и гидрофильным материалам. При сравнении с облаком слов,

представленным в [6] на основе анализа публикаций в зарубежных изданиях, отмечается, что в иностранных университетах больше внимания уделяется исследованию фотокаталитических поверхностей (рис. 3).

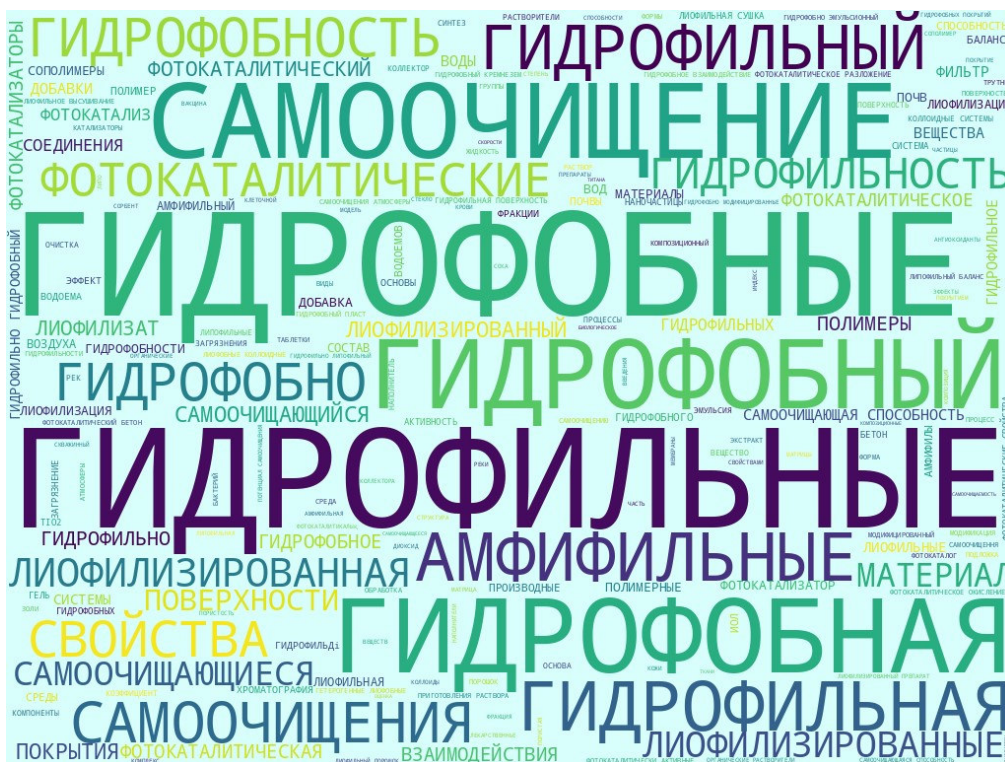


Рис. 2. Облако слов, полученное анализом частоты их употребления в ключевых словах в статьях на сайте ELIBRARY



Рис. 3. Облако слов, полученное анализом частоты их употребления в ключевых словах в статьях, индексируемых базой данных Web of Science [6]

Основная часть. На основе анализа публикаций по данной теме можно выделить следующие механизмы обеспечения способности к самоочищению: химические и физические.

Под химическими понимается очищение поверхности материала в результате химических реакций. Примером может служить самоочищение материалов с фотокаталитическими агентами при воздействии УФ-излучения (солнечного света). Под физическими – получение поверхности с заданной шероховатостью и поверхностной энергией, обеспечивающими ее заданные свойства [7]. Известно, что в зависимости от состава, шероховатости, поверхностной энергии можно добиться получения гидрофобных или гидрофильных, олеофобных, гидрофильных, олеофильных, а также амфиобных и амфифильных, свойства которых распространяются одновременно на полярные и неполярные жидкости [8].

В источнике [6] описаны особенности покрытий с разным уровнем смачивания. На супергидрофильной поверхности при контакте с водой образуется слой растекающейся жидкости, который, за счет гравитации, будет обеспечивать очищение от неорганических и масляных загрязнителей. На супергидрофобной поверхности наблюдается обратный эффект – капли жидкости не растекаются, а стекают по поверхности даже при незначительном угле наклона, собирая неорганические загрязнители. Амфиобные материалы обладают низкой поверхностной энергией и более выраженной микро- и нанощероховатостью. За счет образования воздушных подушек, капли различных жидкостей не растекаются, а скатываются, забирая с собой неорганическую пыль и загрязнители различной природы. Совместное применение гидрофобности/гидрофильности и фотокаталитических свойств позволяет

усилить самоочищающиеся свойства и продлить срок эффективной эксплуатации поверхности.

На сегодняшний день разработано множество способов получения гидрофобных и олеофобных покрытий, включая фотолитографию, золь-гель технологии, электростатическое формование и напыление, нанесение, плазменное травление, плазменное текстурирование [9–10], разделение фаз, технология шаблонов и послойная сборка [11–15]. Современные методы получения материалов с шероховатой поверхностью являются сложными, дорогостоящими и продолжительными по времени. Кроме того, получаемые покрытия имеют недостаточную адгезию между микро- и наноструктурированными частицами и подложками. Некоторые методы ограничены типом применяемой подложки, что препятствует их широкому применению. Ввиду этого актуальной задачей является усовершенствование существующих и разработка новых методов получения покрытий с заданной смачиваемостью, способностью к самоочищению, обладающих высокой адгезией к широкому спектру материалов (природные каменные, бетонные, керамические материалы, металлы, стекло).

В настоящее время существенный интерес приобретают исследования в области получения суперамфиобных покрытий с одинаковой стойкостью к воздействию воды и масел [16].

Для предотвращения смачивания поверхностная энергия твердого тела должна быть ниже поверхностной энергии рассматриваемой жидкости. Известно, что поверхностное натяжение неполярных жидкостей (масел) и органических жидкостей меньше поверхностного натяжения полярных жидкостей (воды), ввиду чего разрабатываемые амфиобные материалы должны обладать низкой поверхностной энергией для обеспечения поверхностного натяжения в 25 % от значения поверхностного натяжения неполярных

жидкостей (масел) [17–19]. Величина 25 % рассчитана из условия, что при краевом угле смачивания $\theta = 90^\circ$ выполняется условие равенства значений поверхностного натяжения на границах «твердое–газ» и «твердое–жидкость» ($\gamma_{ТГ} = \gamma_{ТЖ}$) и верным будет выражение

$$\gamma_{ТЖ} = \gamma_{ТГ} + \gamma_{ЖГ} - 2\sqrt{\gamma_{ТГ}\gamma_{ЖГ}}, \quad (1)$$

откуда $\gamma_{ТГ} = \gamma_{ЖГ}/4$.

Ввиду низкого поверхностного натяжения масел или органических растворителей в диапазоне от 18 до 33 мН/м, требуемое поверхностное натяжение суперамфибной поверхности должно составлять всего несколько мН/м.

Достижение указанных выше параметров поверхности возможно за счет использования материалов с низким поверхностным натяжением, таких как фторалканы, фторированные полимеры, фторированные поверхностно-активные вещества и фторированная плазма [20–21]. Наличие фтора в молекулярных цепях в этих материалах-подложках приводит к снижению поверхностной энергии [22].

Хорошо известно, что многие вещества в нанодисперсном состоянии (к примеру, диоксид кремния (SiO_2)), способны проявлять как гидрофобные, так и олеофобные свойства. Научным коллективом под руководством Ванга [21] методом фотолитографии получен супергидрофобный материал на основе бамбука с краевым углом смачивания $152,5^\circ$. В качестве прототипа была рассмотрена поверхность листьев лотоса. На поверхность наносились монодисперсные силикатные микросферы. Научной группой под руководством Ке [24] разработано кремнеземное покрытие на подложках из стекла, получаемое на основе золь-гель метода. Данное покрытие было модифицировано фторсиланом, что позволило снизить поверхностную энергию, краевой угол смачивания увеличился со 142° до 154° : повышение содержания наночастиц SiO_2 в золе с 0,8 г до 1,5 г приводит к повышению значения краевого угла смачивания на 12° . Дальнейшее увеличение дозировки наночастиц SiO_2 приводит к снижению значений краевого угла.

Авторами [20] предлагается совместное использование пленкообразующих полимеров с гидрофобными неорганическими/органическими материалами как эффективный способ создания покрытий с высокими механическими характеристиками. Отмечается возможность масштабирования технологии и оптимизация финансовых и временных затрат. Гипотеза высокой эффективности данного варианта решения проблемы заключается в том, что полимер, образующий

пленку, обеспечит высокий уровень адгезии к основанию, а органический/неорганический материал повысит твердость и износостойкость полимерного покрытия.

В работе [25] рассмотрен способ получения покрытий с супергидрофильными свойствами, т.е. значения краевого угла смачивания приближены к 0° . Технология получения таких покрытий сводится к приготовлению коллоидного раствора диоксида кремния путем диспергирования наноразмерных частиц SiO_2 в водной среде с последующим центрифугированием. С целью повышения стойкости покрытий предложено заменить водную среду при получении коллоида на эффективный эмульгатор с повышенной адгезионной и пленкообразующей способностью, которым выступает поливиниловый спирт (ПВС). Формирование многослойной структуры покрытия, которая формируется при применении гидролизованного гептадекафтортетрагидродецилтриметоксисилана (ГФС) в системе « SiO_2 –ПВС», способствует проявлению не только гидрофобных, но и олеофобных свойств, при условии сохранения гидрофильности немодифицированной части. Создание покрытия с повторяющимися слоями гидрофильной, гидро- и олеофобной поверхности обусловлено модифицированием состава и наличием высокоразвитой шероховатости компонентов [25–26].

При изменении морфологии поверхности с использованием нанотехнологических подходов «сверху-вниз» или «снизу-вверх» возможно получать как однородные структуры, так и произвольные рельефы различной архитектуры. При создании поверхности с определенными свойствами особое внимание уделяют таким показателям, как смачиваемость, цвет, структура, рассеяние и отражение света, механические свойства и адгезия. Получение заданных параметров достигается путем контроля рельефа, структуры, размерных показателей на уровне нано- и микро-структуры поверхностного слоя материала.

С другой стороны, химический состав также является немаловажным фактором, влияющим на способность реагировать на внешние воздействия. Модификацией химического состава поверхностного слоя можно добиться изменения показателей смачиваемости поверхности, а также ее твердости, атмосферостойкости, термостойкости, износостойчивости [27, 28].

В наши дни большой интерес вызывают многофункциональные («умные») материалы, способные изменять свойства поверхности под воздействием внешних факторов [29].

Как правило, свойства поверхности задаются, в первую очередь, ее химическим составом

и шероховатостью. Воздействие внешних факторов (рис. 4) может привести к изменению поверхностной энергии или рельефа поверхности. Ученными были разработаны интеллектуальные материалы, в которых под воздействием факторов окружающей среды могут меняться свойства

смачиваемости/несмачиваемости – происходит контролируемое изменение между гидрофобностью и гидрофильностью за счет усиления эффекта шероховатости поверхности и обратимого изменения химического состава/конформации поверхности.



Рис. 4. Изменение параметров поверхности материала за счет воздействия внешних факторов

В случае строительных материалов, применяемых для облицовки фасадов и остекления, важными внешними факторами будут являться уровень освещенности, наличие примесей в воздухе и механические воздействия [30–32].

Особый интерес представляют материалы, которые способны изменять свои свойства при воздействии солнечного (УФ) излучения, яркости освещения. Для различных светочувствительных материалов, включая неорганические оксиды и органические полимеры, после ультрафиолетового облучения значение краевого угла смачивания снижается. Облучаемая поверхность может восстанавливаться до исходного состояния при отсутствии светового излучения. Такое попеременное преобразование свойств может повторяться несколько раз.

Примеры материалов со светочувствительностью:

– «умные» эмульгаторы с интеллектуальными частицами, активируемыми при световом воздействии с целью контроля образования, разрушения и конверсии эмульсий Пикеринга при воздействии разного уровня освещенности (в качестве эмульгаторов используются наночастицы TiO_2) [33];

– стеклянные поверхности с микропластинками с нанесенными методом атомно-слоевого осаждения (atomic layer deposition) наночастицами TiO_2 и ZnO с наблюдаемым быстрым фотоактивируемым изменением смачиваемости [34];

– светочувствительные полимерные материалы, состоящие из функциональных групп, таких как азобензол, которые могут быстро менять свои свойства в зависимости от освещенности

при воздействии света определенной длины волны [35, 36];

– полимерные подложки с введенными неорганическими наночастицами, используемые для изготовления фотоиндуцированных разделительных материалов на основе полимеров [37, 38].

Для обеспечения удобства эксплуатации без необходимости введения в систему дорогостоящих химических реагентов учеными в сфере материаловедения разрабатываются технологии получения, применения и составы термочувствительных материалов, для которых внешним воздействием, приводящим к изменению свойств, является изменение температуры окружающей среды [39–42].

Учеными показано, что при изменении температуры возможно регулировать шероховатость поверхности материала и, тем самым, смачиваемость [43–46].

В работах [47–51] для создания чувствительных к температуре поверхностей предложено применение PNI-PAM (поли(N-изопропилакриламид)) с более низкой критической температурой раствора (LCST), приблизительно равной $32–33^\circ C$. Ниже критической температуры преобладает межмолекулярная водородная связь между цепочками PNI-PAM и молекулами воды, что приводит к образованию удлиненной щеточной структуры, обладающей гидрофильностью. Выше критической температуры внутримолекулярная водородная связь в цепях PNI-PAM приводит к их сжатию и обеспечению гидрофобных свойств. Очевидно, подобное обратимое изменение смачиваемости, вызванное конформационным изменением, может быть достигнуто в узком

температурном диапазоне около 10°C и может повторяться в течение многих циклов.

На основе термочувствительного сополимера поли(метилметакрилат)-блок-поли(N-изопропилакриламид) (PMMA-*b*-PNIPAAm) [52] в работе [53] предложены два состава интеллектуальных пленок, наносимых с использованием метода литья из раствора и технологии электроформования (электроспиннинга). В работе [54] описано применение прочных термопластичных мембран из микроволокон полиуретана, покрытых термочувствительным гидрогелем PNI-PAM для эффективного разделения масляно-водной эмульсии: смачиваемость при комнатной температуре (25°C) и при температуре выше минимальной температуры PNI-PAM (32°C) может изменяться между супергидрофильностью и супергидрофобностью.

Помимо PNI-PAM, для создания термочувствительных поверхностей также используются некоторые другие полимеры. Поли(N-винилкапролактан) (PVCL) также относится к термочувствительным полимерам, обладающим сходными свойствами с PNI-PAM. Фазовый переход может происходить в цепях PVCL при температурах выше критических при различном градиенте распределения молекул воды. В работе [55] успешно получены термочувствительные нановолокнистые материалы с сердцевиной и оболочкой из поли(N-винилкапролактама) и акриловой кислоты/полиакрилонитила (P-(VCL-co-AA)/PAN), которые действуют как абсорбенты воды. Из-за высокой химической, термической, механической стабильности и низкой стоимости PNI-PAN использовался в качестве нановолокон со суспензированной сердцевиной.

Несмотря на прогресс в разработке вышеописанных систем, изменяющих смачиваемость при наличии определенных химических или физических воздействий, поиск интеллектуальных, экологичных и экономичных методов обеспечения изменения смачиваемости поверхности привлекает все больше внимания. Появление материалов, реагирующих на наличие определенных газов, предоставило возможность для разработки новых высокоэффективных интеллектуальных материалов и устройств. По сравнению с другими видами воздействий, газовые стимуляторы можно легко добавлять или удалять при работе в больших объемах, что определяет огромный потенциал в промышленном применении [56].

Наиболее широко изученным газовым стимулятором является диоксид углерода (CO₂): многофункциональные мембраны на основе полимеров, активируемых CO₂, при его воздействии позволяют изменять смачиваемость поверхности.

В работе [57] разработаны интеллектуальные нановолокнистые мембраны, полученные технологией электроспиннинга, с большой площадью поверхности раздела фаз, которые могут обратимо изменять смачиваемость маслом/водой с гидрофобного/олеофильного на гидрофильное/олеофобное состояние благодаря чередующемуся воздействию CO₂/N₂. Это явление может быть объяснено эффектами протонирования и депротонирования аминогрупп в PDEAEMA (поли(N,N-диметиламиноэтилметакрилат)).

Среди природных иерархических структур с супергидрофобными поверхностями листья лотоса и лепестки роз вызывают повышенный интерес из-за разных механизмов смачивания: обе эти поверхности имеют большие значения краевого угла и являются гидрофобными, но проявляют совершенно разные показатели по адгезии к воде. Для листьев лотоса характерно состояние Кэсси-Бакстера, при котором капли воды могут легко скатываться с поверхности. Лепестки роз обладают высокой адгезией к каплям воды (импрегнированное состояние Кэсси), что именуется «эффектом лепестка розы». Разница в их поведении при смачивании в основном обусловлена различиями в их микроструктуре и морфологии. Другими словами, основное отличие эффекта лотоса от эффекта лепестка розы заключается в том, что эффект лотоса связан с отталкиванием воды и самоочищением, тогда как эффект лепестка розы – с удержанием капель воды на поверхности без их стекания [58–62]. К примеру, опираясь на данные механизмы, Ким с научной группой разработали поверхность нанокомпозита кремний/эластомер, в которой зазор между кремниевыми микропластинками был изменен с помощью механического напряжения для переключения между упомянутыми состояниями адгезии [63]. Изменяемая смачиваемость может быть достигнута путем изменения зазора при механическом растяжении. Нерастянутая поверхность композита обладает исключительной супергидрофобностью при низком угле скольжения, как на листьях лотоса. Смачивание поверхности композита при растяжении меняется с состояния «лотоса» на состояние «лепестка розы», поскольку капля воды растекается и закрепляется на поверхности эластомера подобно капле на лепестке розы при определенном механическом напряжении.

Еще одним примером гидрофобных материалов могут служить лапки насекомых, способных передвигаться по поверхности воды. Данное явление стало моделью для Ванга и его коллег при разработке механически регулируемых поверхностей (МРП) для перемещения капель жидкости путем распределения подвижных кварцевых

микроволокон с высокой адгезией на несмачиваемой подложке из графеновых нанопластинок, покрытых полиэфирными сетками. Микро- и нанолитровые капли жидкости на поверхности МРП проявляют способность изменения адгезии с высокой на низкую за 1 секунду [64].

В полях чувствительного смачивания широко изучались азобензолы, известные своими обратимыми изменениями в структуре при облучении светом различных длин волн. В сравнении с обычным изменением с помощью светового воздействия, в работах Шиммеля описано механически вызванное изменение самоорганизующегося монослоя азобензола, приводящее к изменению степени смачиваемости поверхности, силы сцепления и трения. Такая механически инициируемая цис-транс-изомеризация стимулируется либо локально с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ), либо макроскопическим воздействием на частицы [65].

Патентный поиск был произведен с помощью сайта www1.fips.ru.

В рамках исследования внимание обратили на себя следующие патенты:

1) Патент № 2 494 984 «Покрытое хитозаном гидрофобное стекло и способы его изготовления» авторов Джозеф Бривост, Ричард М. Демарко [66]. В данном изобретении предложен способ изготовления изделий из стекла с гидрофобной поверхностью. Авторами установлена более высокая длительность эксплуатации при нормальных условиях разработанных гидрофобных покрытий, полученных с помощью хитозанового покрытия, по сравнению с силиконовыми. Хитозановое покрытие химически связывают со стеклом и обрабатывают для придания ему гидрофобности, что исключает необходимость частой замены гидрофобного покрытия, как в случае ранее применяемых материалов.

В тексте патента авторами указано, что основной областью применения разработанных стеклянных поверхностей с гидрофобным покрытием является автомобильная отрасль. Однако это покрытие также можно применять на других стеклянных изделиях, таких как ветровые стёкла и окна в авиации и морских судах, а также в остеклении гражданских и промышленных зданий.

2) Патент № 2 516 407 «Покрытие из дентритового полиуретана» автора Томас Ф. Чоате [67]. Данное изобретение связано с защитой поверхностей (особое внимание уделяется окрашенным поверхностям) от негативных факторов окружающей среды, к числу которых относятся перепады температур, перепады влажности, вода (дождь), снег, лед (град), сажа, смог, грязь, пти-

чий помет, отложения солей, длительное воздействие солнечного света, химическое воздействие, кислотные осадки и др. Указанные факторы вызывают деструктивные процессы в декоративных и защитных покрытиях, появление царапин, трещин, снижающих их эффективность.

На производствах, продукция которых регулярно подвергается негативному воздействию окружающей среды, проблема защиты поверхностей от внешних факторов является актуальной и для ее решения осуществляется большой объем исследовательских работ. Одним из возможных решений в случае окрашенных металлических поверхностей является нанесение на них защитных бесцветных покрытий, позволяющих нивелировать негативное воздействие на слой краски и ее разрушение.

Автором в патенте предложен состав покрытия с улучшенными эксплуатационными и защитными свойствами. В состав описанной композиции для получения защитного покрытия входят 2 комплексных компонента, которые смешиваются, формируя композицию покрытия.

В состав первого компонента входит дендритный полимер, акриловый полиол, наночастицы оксидов металлов, инкапсулированные в полимер, светостабилизаторы и поглотители, такие как пространственно затрудненный аминный светостабилизатор и ультрафиолетовый поглотитель, сшивающий катализатор и первый безводный растворитель для растворения и дисперсии вышеуказанных материалов, а также второй компонент, состоящий из сшивающего агента и почти безводного растворителя, который может быть аналогичным вышеуказанному, либо же другим, с целью расширения свойств создаваемого покрытия. Технический результат – покрытие обладает высокой водонепроницаемостью, устойчивостью к царапинам и самоочищающимися свойствами, а также сохраняет блеск в течение длительного времени.

3) Патент № 2 490 077 «Композиция для придания поверхности свойств самоочистки на основе эффекта лотоса» авторов О.В. Горшкова, В.В. Гольдин, Д.Н. Кондратьев [68]. Основываясь на исследованиях эффекта лотоса, авторы провели разработку состава самоочищающегося покрытия для широкого спектра материалов. Особое внимание уделяется достижению низкой смачиваемости за счет образования нанорельефа поверхности. Основным элементом разработанного состава покрытия является гидрофобизирующий компонент (фторсодержащие полиоксаликиленовые производные), который подвергается растворению в органических растворителях. Для формирования структуры предложено ис-

пользование компонентов, позволяющих получить специфический нанорельеф на поверхности (органорастворимыми неорганическими прекурсорами). Массовое соотношение компонентов подбирается с учетом условий эксплуатации материалов для достижения оптимальных свойств. Техническим результатом применения этой технологии является получение поверхности с уникальной текстурой и высокой водоотталкивающей способностью, что значительно повышает её самоочищающиеся свойства.

В заключении отметим, что лиофобные поверхности находят применение в системах очистки воздуха и воды, антибактериальных покрытиях, покрытиях против запотевания, антиобледенительных составах, антикоррозионных составах, антифоулинговых покрытиях. Данное направление активно развивается во многих странах, что подтверждается значительным объемом статей, опубликованных в высокорейтинговых журналах, наличием патентов и ноу-хау.

Выводы. Анализ результатов исследований в области разработки и применения самоочищающихся покрытий показывает, что их внедрение может способствовать увеличению срока службы материалов и снизить эксплуатационные расходы. В рассмотренных литературных источниках описаны достижения в разработке гидрофобных и гидрофильных покрытий, а также на амфиобных покрытиях, обеспечивающих защиту одновременно от веществ с разной полярностью.

Рассмотренные в работах «умные» покрытия способны менять свойства поверхности в ответ на внешние воздействия (изменение температуры, влажности, освещенности и др.). Их внедрение возможно в разных климатических зонах и условиях эксплуатации, что открывает широкие перспективы для использования.

Самоочищающиеся покрытия являются актуальной сферой исследований для совершенствования строительной отрасли, особенно когда речь идет об устойчивом развитии и защите окружающей среды. Использование таких инновационных решений способствует более экономичному и экологичному строительству, сохранению внешнего вида зданий и увеличению срока службы материалов, что позволяет сохранять природные ресурсы и уменьшать углеродный след в процессе эксплуатации зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Toktarbaiuly O., Kurbanova A., Ualibek O., Seralin A., Zhunussova T., Sugurbekova G., Nuraje N. Fabrication of Superhydrophobic Self-Cleaning Coatings by Facile Method: Stable after Exposure to Low Temperatures and UV Light // *Bulletin of the Karaganda University. Chemistry Series*. 2022. No.

3(107). Pp. 158–167. DOI: 10.31489/2022Ch3/3-22-14

2. Айл Н., Вулин А., Велкова Е., Баумгарднер А. Как обеспечить будущее с низким углеродным следом // *Control Engineering Россия*. 2020. № 5(89). С. 22–28.

3. Андалоро А., Маццучелли Э.С., Луккини А., Педерфери М.П. Самоочищающиеся фасадные покрытия // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2020. № 3. С. 18–23.

4. Никитин А.В., Рощин П.В., Савельев А.А., Огородникова Е.М., Изотенко Е.В., Рашевская Ю.А., Гилаев Г.Г. Углеродный след продукции в современных условиях // *Нефть. Газ. Новации*. 2023. № 7(272). С. 11–17.

5. Белова С.Б., Старчикова И.Ю., Старчикова Е.С. Углеродный след: проблемы и пути решения // *Наука и бизнес: пути развития*. 2020. № 3 (105). С. 19–21.

6. Liu G., Zhao T., Fei H., Li F., Guo W., Yao Z., Feng Z. A review of various self-cleaning surfaces, durability and functional applications on building exteriors // *Construction and building materials*. 2023. Vol. 409. Art. Num. 134084. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134084

7. Назаров В.В. Коллоидная химия: учеб. пособие // М.: ДеЛи плюс, 2015. 250 с.

8. Нажипкызы М., Мансуров З.А. Супергидрофобные материалы и покрытия: обзор // *Горение и плазмохимия*. 2020. Т. 18. № 4. С. 163–189. DOI: 10.18321/cpc393

9. Ellinas K., Pujari S.P., Dragatogiannis D.A., Charitidis C.A., Tserepi A., Zuilhof H., Gogolides E. Plasma Micro-Nanotextured, Scratch, Water and Hexadecane Resistant, Superhydrophobic, and Superamphiphobic Polymeric Surfaces with Perfluorinated Monolayers // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2014. Vol. 6. Iss. 9. Pp. 6510–6524. DOI: 10.1021/am500043z

10. Gnanappa A.K., Papageorgiou D.P., Gogolides E., Tserepi A., Papathanasiou A.G., Boudouvis A.G. Hierarchical, Plasma Nanotextured, Robust Superamphiphobic Polymeric Surfaces Structurally Stabilized through a Wetting–Drying Cycle // *Plasma Processes and Polymers*. 2012. Vol. 9 (3). Pp. 304–315. DOI: 10.1002/ppap.201100124

11. Cengiz U., Erbil H.Y. Superhydrophobic perfluoropolymer surfaces having heterogeneous roughness created by dip-coating from solutions containing a nonsolvent // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 292. Pp. 591–597. DOI: 10.1016/j.apusc.2013.12.013

12. Darmanin T., Guittar D.F. Superhydrophobic fiber mats by electrodeposition of fluorinated poly(3,4-ethyleneoxythiathioephene) // *Journal of the American Chemical Society*. 2011. Vol. 133. Pp. 15627–15634. DOI: 10.1021/ja205283b

13. Qian H., Zhang D., Deng L., Huang L., Xu D., Du C., Li X. The role of surface morphology in the barrier properties of epoxy coatings in different corrosion environments // *Progress in Organic Coatings*. 2017. Vol. 104. Pp. 199–209. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2016.11.002
14. Jeevahan J., Chandrasekaran M., Joseph G.B., Durairaj R.B., Mageshwaran G. Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges // *Journal of Coatings Technology and Research*. 2018. Vol. 15. Pp. 231–250. DOI: 10.1007/s11998-017-0011-x
15. Motlagh N.V., Birjandi F.C., Sargolzaei J., Shahtahmassebi N. Durable, superhydrophobic, superoleophobic and corrosion resistant coating on the stainless steel surface using a scalable method // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 283. Pp. 636–647. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.06.160
16. Tian L., Sun M., Liu Y, He B., Dong G., Hao H. Superhydrophobic and highly oleophobic coatings based on litchi-like FDA-SiO₂-PS nanocomposite with excellent self-cleaning and anti-bioadhesion performances // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023. Vol. 667. Pp. 131395–131395. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.131395
17. Zhang K., Xu F., Gao Y. Superhydrophobic and oleophobic dual-function coating with durability and self-healing property based on a waterborne solution // *Applied Materials Today*. 2021. Vol. 22. Pp. 100970. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.100970
18. Gou X., Guo Z. Surface topographies of biomimetic superamphiphobic materials: design criteria, fabrication and performance // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2019. Vol. 269. Pp. 87–121. DOI: 10.1016/j.cis.2019.04.007
19. Tsujii K., Yamamoto T., Onda T., Shibuichi S. Super Oil-Repellent Surfaces // *Angewandte Chemie International*. 1997. Vol. 36. Iss. 9. Pp. 1011–1012. DOI: 10.1002/anie.199710111
20. Wang G., Li A., Li K., Zhao Y., Ma Y., He Q. A fluorine-free superhydrophobic silicone rubber surface has excellent self-cleaning and bouncing properties // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2021. Vol. 588. Pp. 175–183. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.12.059
21. Tian Y., Li H., Wang M., Yang C., Yang Z., Liu X. Insights into the stability of fluorinated superhydrophobic coating in different corrosive solutions // *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 151. Art. Num. 106043. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.106043
22. Яруллин А.Ф., Абзальдинов Х.С., Касперович А.В., Прокопчук Н.Р., Казаков Ю.М., Стоянов О.В. Поверхностная модификация резинотехнических изделий химическими методами (обзор) // *Вестник Технологического университета*. 2022. Т. 25. № 11. С. 50–58. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_11_50
23. Wang F., Wang L., Wu H., Pang J., Gu D., Li S. A lotus-leaf-like SiO₂ superhydrophobic bamboo surface based on soft lithography // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2017. Vol. 520. Pp. 834–840. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.02.043
24. Ke C., Zhang C., Wu X., Jiang Y. Highly transparent and robust superhydrophobic coatings fabricated via a facile sol-gel process // *Thin Solid Films*. 2021. Vol. 723. Art. Num. 138583. DOI: 10.1016/j.tsf.2021.138583
25. Соломянский А.Е., Коленченко Д.А., Мельникова Г.Б., Синькевич Ю.В., Агабеков В.Е. Гидро- и олеофобные покрытия на основе поливинилового спирта и наночастиц диоксида кремния // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2018. Т. 62. № 3. С. 298–303. DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-3-298-303
26. Lyoo W.S., Lee H.W. Synthesis of high-molecular-weight poly(vinyl alcohol) with high yield by novel one-batch suspension polymerization of vinyl acetate and saponification // *Colloid & Polymer Science*. 2002. Vol. 280. № 9. Pp. 835–840. DOI: 10.1007/s00396-002-0691-2
27. Бессмертный В.С., Пучка О.В., Бондаренко Д.О., Антропова И.А., Брагина Л.Л. Плазмохимическое модифицирование стеновых строительных материалов // *Строительные материалы и изделия*. 2018. Т. 1. № 2. С. 11–18.
28. Lou X., Huang Y., Yang X., Zhu H., Heng L., Xia F. External stimuli responsive liquid-infused surfaces switching between slippery and nonslippery states: fabrications and applications // *Advanced Functional Materials*. 2020. Vol. 30. Iss. 10. Art. Num. 1901130. DOI: 10.1002/adfm.201901130
29. Liu H., Zhang L., Huang J., Mao J., Chen Z, Mao Q., Ge M., Lai Y. Smart surfaces with reversibly switchable wettability: Concepts, synthesis and applications // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 300. Art. Num. 102584. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102584
30. Ульбиева И.С., Ужахов К.М. Современные технологии и материалы, применяемые для отделки фасадов зданий // *Перспективы науки*. 2017. № 1 (88). С. 38–40.
31. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Азаров В.Н., Кузьмичев А.А. Здание, как очиститель воздуха, маркер его загрязнённости и объект видеоэкологии // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2020. № 1(29). С. 69–84. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-29-1-69-84
32. Бондаренко И.Н., Ястребова Н.Б. Воздействие окружающей среды на конструкции жилых

зданий // Жилищное строительство. 2003. № 11. С. 4.

33. Zhang Q., Bai R.-X., Guo T., Meng T. Switchable Pickering Emulsions Stabilized by Awakened TiO₂ Nanoparticle Emulsifiers Using UV/Dark Actuation // ACS Applied Materials and Interfaces. 2015. Vol. 7(33). Pp. 18240–18246. DOI: 10.1021/acsami.5b06808

34. Yang Y., Zhang L., Wang J., Wang X., Duan L., Wang N., Xiao F., Xie Y., Zhao J. Inorganic Surface Coating with Fast Wetting–Dewetting Transitions for Liquid Manipulations // ACS Applied Materials and Interfaces. 2018. Vol. 10 (22). Pp. 19182–19188. DOI: 10.1021/acsami.8b02537

35. Feng C.L., Zhang Y.J., Jin J., Song Y.L., Xie L.Y., Qu G.R., Lei J., Dao B.Z. Reversible wettability of photoresponsive fluorine-containing azobenzene polymer in Langmuir–Blodgett films // Langmuir. 2001. Vol. 17. Iss. 15. Pp. 4593–4597. DOI: 10.1021/la010071r

36. Anastasiadis S.H. Development of functional polymer surfaces with controlled wettability // Langmuir. 2013. Vol. 29(30). Pp. 9277–9290. DOI: 10.1021/la400533u

37. Gaputo G., Cortese B., Nobile C., Salerno M., Athanassiou A. Reversibly lightswitchable wettability of hybrid organic/inorganic surfaces with dual micro-/nanoscale roughness // Advanced Functional Materials. 2009. Vol. 19. Iss. 8. Pp. 1149–1157. DOI: 10.1002/adfm.200800909

38. Hu J., Gao Q., Xu L., Wang M., Zhang M., Zhang K., Lui W., Wu G. Functionalization of cotton fabrics with highly durable polysiloxane-TiO₂ hybrid layers: potential applications for photo-induced water-oil separation, UV shielding, and selfcleaning // Journal of Materials Chemistry A. 2018. Vol. 6. Iss. 14. Pp. 6085–6095. DOI: 10.1039/C7TA11231A

39. Liu F., Urban M.W. Recent advances and challenges in designing stimuli-responsive polymers // Progress in Polymer Science. 2010. Vol. 35. Iss. 1–2. Pp. 3–23. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2009.10.002

40. Roy D., Cambre J.N., Sumerlin B.S. Future perspectives and recent advances in stimuli-responsive materials // Progress in Polymer Science. 2010. Vol. 35. Iss. 1–2. Pp. 278–301. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.10.008

41. Lee H.-I., Pietrasik J., Sheiko S.S., Matyjaszewski K. Stimuli-responsive molecular brushes // Progress in Polymer Science. 2010. Vol. 35. Iss. 1–2. Pp. 24–44. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2009.11.002

42. Wang D., Jin Y., Zhu X., Yan D. Synthesis and applications of stimuli-responsive hyperbranched polymers // Progress in Polymer Science. 2017. Vol. 64. Pp. 114–153. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2016.09.005

43. Guo F., Guo Z. Inspired smart materials with external stimuli responsive wettability: a review // RSC Advances. 2016. Vol. 6. Iss. 43. Pp. 36623–36641. DOI: 10.1039/C6RA04079A

44. Chang B., Zhang B., Sun T. Smart polymers with special wettability // Small. 2017. Vol. 13. Iss. 4. Art. Num. 1503472. DOI: 10.1002/smll.201503472

45. Hu J., Meng H., Li G., Ibekwe S.I. A review of stimuli-responsive polymers for smart textile applications // Smart Materials and Structures. 2012. Vol. 21. Iss. 5. Art. Num. 053001. DOI: 10.1088/0964-1726/21/5/053001

46. Zhai L. Stimuli-responsive polymer films // Chemical Society Review. 2013. Vol. 42. Iss. 17. Pp. 7148–7160. DOI: 10.1039/c3cs60023h

47. Sun T., Wang G., Feng L., Liu B., Ma Y., Jiang L., Zhu D. Reversible Switching between Superhydrophilicity and Superhydrophobicity // Angewandte Chemie International Edition. 2004. Vol. 43. Iss. 3. Pp. 357–360. DOI: 10.1002/anie.200352565

48. Fu Q., Rama Rao G.V., Basame S.B., Keller D.J., Artyushkova K., Fulghum J.E., Lopez G.P. Reversible control of free energy and topography of nanostructured surfaces // Journal of the American Chemical Society. 2004. Vol. 126. Iss. 29. Pp. 8904–8905. DOI: 10.1021/ja047895q

49. Chen L., Liu M., Lin L., Zhang T., Ma J., Song Y., Jiang L. Thermal-responsive hydrogel surface: tunable wettability and adhesion to oil at the water/solid interface // Soft Matter. 2010. Vol. 6. Iss. 12. Pp. 2708–2712. DOI: 10.1039/C002543G

50. Byun J., Shin J., Kwon S., Jang S., Kim J.K. Fast and reversibly switchable wettability induced by a photothermal effect // Chemical Communications. 2012. Vol. 48. Iss. 74. Pp. 9278–9280. DOI: 10.1039/c2cc34601j

51. Zhang D., Cheng Z., Kang H., Yu J., Liu Y., Jiang L. A smart superwetting surface with responsivity in both surface chemistry and microstructure // Angewandte Chemie. 2018. Vol. 130. Iss. 14. Pp. 3763–3767. DOI: 10.1002/ange.201800416

52. Tang T., Castelletto V., Parras P., Hamley I.W., King S.M., Roy D., Perrier S., Hoogenboom R., Schubert U.S. Thermo-responsive Poly(methyl methacrylate)-block-poly(N-isopropylacrylamide) Block Copolymers Synthesized by RAFT Polymerization: Micellization and Gelation // Macromolecular Chemistry and Physics. 2006. Vol. 207. Iss. 19. Pp. 1718–1726. DOI: 10.1002/macp.200600309

53. Li J.-J., Zhu L.-T., Luo Z.-H. Electrospun fibrous membrane with enhanced switchable oil/water wettability for oily water separation // Chemical Engineering Journal. 2016. Vol. 287. Pp. 474–481. DOI: 10.1016/j.cej.2015.11.057

54. Ou R., Wei J., Jiang L., Simon G.P., Wang H. Robust thermoresponsive polymer composite membrane with switchable superhydrophilicity and superhydrophobicity for efficient oil–water separation // *Environmental Science & Technology*. 2016. Vol. 50. Iss. 2. Pp. 906–914. DOI: 10.1021/acs.est.5b03418
55. Kim S., Choi H. Switchable wettability of thermoresponsive core–shell nanofibers for water capture and release // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2019. Vol. 7. Iss. 24. 19870–19879. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b05273
56. Zhang Q., Lei L., Zhu S. Gas-responsive polymers // *ACS Macro Letters*. 2017. Vol. 6. Iss. 5. Pp. 515–522. DOI: 10.1021/acsmacrolett.7b00245
57. Che H., Huo M., Peng L., Fang T., Liu N., Feng L., Wei Y., Yan J. CO₂-responsive nanofibrous membranes with switchable oil/water wettability // *Angewandte Chemie International Edition*. 2015. Vol. 54. Iss. 31. Pp. 8934–8938. DOI: 10.1002/anie.201501034
58. Bhushan B., Nosonovsky M. The rose petal effect and the modes of superhydrophobicity // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2010. Vol. 368. Iss. 1929. Pp. 4713–4728. DOI: 10.1098/rsta.2010.0203
59. Bhushan B., Her E.K. Fabrication of superhydrophobic surfaces with high and low adhesion inspired from rose petal // *Langmuir*. 2010. Vol. 26. Iss. 11. Pp. 8207–8217. DOI: 10.1021/la904585j
60. Yong J., Chen F., Yang Q., Zhang D., Du G., Si J., Yun F., Hou X. Femtosecond laser weaving superhydrophobic patterned PDMS surfaces with tunable adhesion // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2013. Vol. 117. Iss. 47. Pp. 24907–24912. DOI: 10.1021/jp408863u
61. Wang C., Shao R., Wang G., Sun S. Hierarchical hydrophobic surfaces with controlled dual transition between rose petal effect and lotus effect via structure tailoring or chemical modification // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. Vol. 622. Art. Num. 126661. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126661
62. Mukhopadhyay R.D., Vedhanarayanan B., Ajayaghosh A. Creation of «Rose Petal» and «Lotus Leaf» Effects on Alumina by Surface Functionalization and Metal-Ion Coordination // *Angewandte Chemie International edition*. 2017. Vol. 56. Iss. 50. Pp. 16018–16022. DOI: 10.1002/anie.201709463
63. Park J.K., Yang Z., Kim S. Black silicon/elastomer composite surface with switchable wettability and adhesion between lotus and rose petal effects by mechanical strain // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. Vol. 9. Iss. 38. Pp. 33333–33340. DOI: 10.1021/acsami.7b11143
64. Tang X., Zhu P., Tian Y., Zhou X., Kong T., Wang L. Mechano-regulated surface for manipulating liquid droplets // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. Art. Num. 14831. DOI: 10.1038/ncomms14831
65. Berson J., Moosmann M., Walheim S., Schimmel T. Mechanically induced switching of molecular layers // *Nano Letters*. 2019. Vol. 19. Iss. 2. Pp. 816–822. DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b03987
66. Пат. 2494984, Российская Федерация, МПК C03C 17/32. Покрытое хитозаном гидрофобное стекло и способы его изготовления / Д. Бристов, Р.М. Демарко; патентообладатель Аграртек Интернэшнл, Инк. № 2010142412/03; заявл. 18.03.2009; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28. 8 с.
67. Пат. 2516407, Российская Федерация, МПК C09D 175/04. Покрытие из дендритного полиуретана / Т.Ф. Чоате; патентообладатель Нановер Текноллоджис Инк. № 2011102479/05; заявл. 08.07.2009; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14. 29 с.
68. Пат. 2490077, Российская Федерация, МПК B08B 17/00, B82B 3/00, C03C 17/00. Композиция для придания поверхности свойств самоочистки на основе эффекта лотоса / О.В. Горшкова, В.В. Гольдин, Д.Н. Кондратьев; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Научно Производственный Центр «Квадра». № 2011150422/05; заявл. 13.12.2011; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23. 6 с.

Информация об авторах

Буковцова Александра Игоревна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и эксплуатации горно-металлургических комплексов. E-mail: 9507131581@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, микрорайон им. Макаренко, д. 42.

Нецвет Дарья Дмитриевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства и эксплуатации горно-металлургических комплексов. E-mail: netsvet_dd@mail.ru. Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС». Россия, 309516, г. Старый Оскол, микрорайон им. Макаренко, д. 42.

Жерновская Ирина Васильевна, старший преподаватель, кафедра высшей математики.
E-mail: ziv_1111@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 21.06.2024 г.

© Буковцова А.И., Нецвет Д.Д., Жерновская И.В., 2024

¹*Bukovtsova A.I.*, ^{*}¹*Netsvet D.D.*, ²*Zhernovskaya I.V.*

Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch)

of the FSAEI HE «National University of Science and Technology «MISIS» (STI NITU MISIS)

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: netsvet_dd@mail.ru*

ANALYSIS OF SELF-CLEANING MECHANISMS IN CONSTRUCTION MATERIALS

Abstract. *Currently, there is a need for the construction of buildings with high durability and performance properties, which can be realized by the development and implementation of self-cleaning coatings and materials with their application. The use of building materials with a self-cleaning surface is an economical and environmentally friendly solution to maintain the appearance and cleanliness of building facades and significantly increase the durability of building structures, which is why this area is relevant for the construction industry.*

The paper provides an overview of the work on the development and research of self-cleaning coatings with hydrophobic and hydrophilic properties. The main indicators that are controlled for self-cleaning coatings are indicated. "Smart" coatings are also considered, the properties of which vary depending on the influencing factors of the external environment.

There are two main types of self-cleaning surfaces: hydrophobic and hydrophilic. Hydrophobic surfaces are characterized by high water repellency, which is achieved due to the presence of micro- and nanostructures. Hydrophilic surfaces, on the contrary, have the ability to attract water. The required surface properties and operating conditions of the material determine the choice of the appropriate type of coating and technology of its application. However, scientists are currently developing amphiphobic and amphiphilic materials, the properties of which extend simultaneously to polar and non-polar liquids, which makes it possible to achieve higher performance indicators of coatings and the effectiveness of their application.

The literary search was carried out based on papers published over the past 5 years, reviewed in the databases of the RSCI, Scopus and Web of Science.

Keywords: *self-cleaning, hydrophobic coatings, hydrophilic coatings, roughness, surface energy*

REFERENCES

1. Toktarbaiuly O., Kurbanova A., Ualibek O., Seralin A., Zhunussova T., Sugurbekova G., Nuraje N. Fabrication of Superhydrophobic Self-Cleaning Coatings by Facile Method: Stable after Exposure to Low Temperatures and UV Light. *Bulletin of the Karaganda University. Chemistry Series.* 2022. No. 3(107). Pp. 158–167. DOI:10.31489/2022Ch3/3-22-14
2. Ail N., Vaulin A., Volkova E., Baumgardner A. How to secure a low-carbon future. *Control Engineering Russia.* 2020. No. 5(89). Pp. 22–28. (rus)
3. Andaloro A., Mazzucchelli E.S., Lucchini A., Pedferri M.P. Self-cleaning facade coatings. *The Russian Coatings Journal (Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye).* 2020. No. 3. Pp. 18–23. (rus)
4. Nikitin A.V., Roschin P.V., Saveliev A.A., Ogorodnikova E.M., Izotenko E.V., Rashevskaya Yu.A., Gilaev G.G. Carbon product footprint in modern conditions. *Oil. Gas. Innovations.* 2023. No. 7(272). Pp. 11–17. (rus)
5. Belova S.B., Starchikova I.Yu., Starchikova E.S. Carbon footprint: problems and solutions. *Science and Business: Ways of Development.* 2020. No. 3 (105). Pp. 19–21. (rus)
6. Liu G., Zhao T., Fei H., Li F., Guo W., Yao Z., Feng Z. A review of various self-cleaning surfaces, durability and functional applications on building exteriors. *Construction and building materials.* 2023. Vol. 409. Art. Num. 134084. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134084
7. Nazarov V.V. *Colloidal chemistry: textbook. [Kolloidnaya himiya: ucheb. posobie].* Moscow: DeLi plus, 2015. 250 p. (rus)
8. Nazhipkyzy M., Mansurov Z.A. Super hydrophobic materials and coatings: Overview. *Combustion and Plasma Chemistry.* 2020. Vol. 18. No. 4. Pp. 163–189. DOI: 10.18321/cpc393 (rus)
9. Ellinas K., Pujari S.P., Dragatogiannis D.A., Charitidis C.A., Tserepi A., Zuilhof H., Gogolides E. Plasma Micro-Nanotextured, Scratch, Water and Hexadecane Resistant, Superhydrophobic, and Su-

- peramphiphobic Polymeric Surfaces with Perfluorinated Monolayers. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2014. Vol. 6. Iss. 9. Pp. 6510–6524. DOI: 10.1021/am5000432
10. Gnanappa A.K., Papageorgiou D.P., Gogolides E., Tserepi A., Papanthasiou A.G., Boudouvis A.G. Hierarchical, Plasma Nanotextured, Robust Superamphiphobic Polymeric Surfaces Structurally Stabilized through a Wetting–Drying Cycle. *Plasma Processes and Polymers*. 2012. Vol. 9 (3). Pp. 304–315. DOI: 10.1002/ppap.201100124
11. Cengiz U., Erbil H.Y. Superhydrophobic perfluoropolymer surfaces having heterogeneous roughness created by dip-coating from solutions containing a nonsolvent. *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 292. Pp. 591–597. DOI: 10.1016/j.apusc.2013.12.013
12. Darmanin T., Guittar D F. Superhydrophobic fiber mats by electrodeposition of fluorinated poly(3,4-ethyleneoxythiathioephene). *Journal of the American Chemical Society*. 2011. Vol. 133. Pp. 15627–15634. DOI: 10.1021/ja205283b
13. Qian H., Zhang D., Deng L., Huang L., Xu D., Du C., Li X. The role of surface morphology in the barrier properties of epoxy coatings in different corrosion environments. *Progress in Organic Coatings*. 2017. Vol. 104. Pp. 199–209. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2016.11.002
14. Jeevahan J., Chandrasekaran M., Joseph G.B., Durairaj R.B., Mageshwaran G. Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2018. Vol. 15. Pp. 231–250. DOI: 10.1007/s11998-017-0011-x
15. Motlagh N.V., Birjandi F.C., Sargolzaei J., Shahtahmassebi N. Durable, superhydrophobic, superoleophobic and corrosion resistant coating on the stainless steel surface using a scalable method. *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 283. Pp. 636–647. DOI: 10.1016/j.apusc.2013.06.160
16. Tian L., Sun M., Liu Y, He B., Dong G., Hao H. Superhydrophobic and highly oleophobic coatings based on litchi-like FDA-SiO₂-PS nanocomposite with excellent self-cleaning and anti-bioadhesion performances. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023. Vol. 667. Pp 131395–131395. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2023.131395
17. Zhang K., Xu F., Gao Y. Superhydrophobic and oleophobic dual-function coating with durability and self-healing property based on a waterborne solution. *Applied Materials Today*. 2021. Vol. 22. Pp. 100970. DOI: 10.1016/j.apmt.2021.100970
18. Gou X., Guo Z. Surface topographies of biomimetic superamphiphobic materials: design criteria, fabrication and performance. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2019. Vol. 269. Pp. 87–121. DOI: 10.1016/j.cis.2019.04.007
19. Tsujii K., Yamamoto T., Onda T., Shibuichi S. Super Oil-Repellent Surfaces. *Angewandte Chemie International*. 1997. Vol. 36. Iss. 9. Pp. 1011–1012. DOI: 10.1002/anie.199710111
20. Wang G., Li A., Li K., Zhao Y., Ma Y., He Q. A fluorine-free superhydrophobic silicone rubber surface has excellent self-cleaning and bouncing properties. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2021. Vol. 588. Pp. 175–183. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.12.059
21. Tian Y., Li H., Wang M., Yang C., Yang Z., Liu X. Insights into the stability of fluorinated superhydrophobic coating in different corrosive solutions. *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 151. Art. Num. 106043. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.106043
22. Yarullin A.F., Abzalidinov Kh.S., Kasperovich A.V., Prokopchuk N.R., Kazakov Yu.M., Stoyanov O.V. Surface modification of rubber products by chemical methods (Review). *Bulletin Of The Technological University*. 2022. Vol. 25. No. 11. Pp. 50–58. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_11_50 (rus)
23. Wang F., Wang L., Wu H., Pang J., Gu D., Li S. A lotus-leaf-like SiO₂ superhydrophobic bamboo surface based on soft lithography. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2017. Vol. 520. Pp. 834–840. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.02.043
24. Ke C., Zhang C., Wu X., Jiang Y. Highly transparent and robust superhydrophobic coatings fabricated via a facile sol-gel process. *Thin Solid Films*. 2021. Vol. 723. Art. Num. 138583. DOI: 10.1016/j.tsf.2021.138583
25. Salamianski A.E., Kalenchanka D.A., Melnikova G.B., Sinkevich Yu.V., Agabekov V.E. Hydro- and oleophobic coatings based on polyvinyl alcohol and silicon dioxide nanoparticles. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus (Doklady Nacional'noj akademii nauk Belarusi)*. 2018. Vol. 62. No. 3. Pp. 298–303. DOI: 10.29235/1561-8323-2018-62-3-298-303 (rus)
26. Lyoo W.S., Lee H.W. Synthesis of high-molecular-weight poly(vinyl alcohol) with high yield by novel one-batch suspension polymerization of vinyl acetate and saponification. *Colloid & Polymer Science*. 2002. Vol. 280. № 9. Pp. 835–840. DOI: 10.1007/s00396-002-0691-2
27. Bessmertnyy V.S., Sokolova O.N., Bondarenko N.I., Bondarenko D.O., Bragina L.L., Makarov A.V., Kochurin D.V. Plasmachemical modification of thermal insulated blocks with decorative coating. *Construction Materials and Products*. 2018. Vol. 1. No. 2. Pp. 11–18. (rus)

28. Lou X, Huang Y, Yang X, Zhu H, Heng L, Xia F. External stimuli responsive liquid-infused surfaces switching between slippery and nonslippery states: fabrications and applications. *Advanced Functional Materials*. 2020. Vol. 30. Iss. 10. Art. Num. 1901130. DOI: 10.1002/adfm.201901130
29. Liu H., Zhang L., Huang J., Mao J., Chen Z, Mao Q., Ge M., Lai Y. Smart surfaces with reversibly switchable wettability: Concepts, synthesis and applications. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 300. Art. Num. 102584. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102584
30. Ulbieva I.S., Uzhanov K.M. Modern technologies and materials applied for finishing of building facades. *Science Prospects*. 2017. No.1 (88). Pp. 38–40. (rus)
31. Ilyichev V.A., Kolchunov V.I., Azarov V.N., Kuzmichev A.A. Building like an air cleaner, a marker of its contamination and a video ecology facility. *Biospheric compatibility: human, region, technologies*. 2020. No. 1 (29). Pp. 69–84. DOI: 10.21869/2311-1518-2020-29-1-69-84 (rus)
32. Bondarenko I.N., Yastrebova N.B. The impact of the environment on the structures of residential buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo (Housing Construction)*. 2003. No. 11. Pp.4. (rus)
33. Zhang Q., Bai R.-X., Guo T., Meng T. Switchable Pickering Emulsions Stabilized by Awakened TiO₂ Nanoparticle Emulsifiers Using UV/Dark Actuation. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2015. Vol. 7(33). Pp. 18240–18246. DOI: 10.1021/acsami.5b06808
34. Yang Y., Zhang L., Wang J., Wang X., Duan L., Wang N, Xiao F., Xie Y., Zhao J. Inorganic Surface Coating with Fast Wetting–Dewetting Transitions for Liquid Manipulations. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2018. Vol. 10 (22). Pp. 19182–19188. DOI: 10.1021/acsami.8b02537
35. Feng C.L., Zhang Y.J., Jin J., Song Y.L., Xie L.Y., Qu G.R., Lei J., Dao B.Z. Reversible wettability of photoresponsive fluorine-containing azobenzene polymer in Langmuir–Blodgett films. *Langmuir*. 2001. Vol. 17. Iss. 15. Pp. 4593–4597. DOI: 10.1021/la010071r
36. Anastasiadis S.H. Development of functional polymer surfaces with controlled wettability. *Langmuir*. 2013. Vol. 29(30). Pp. 9277–9290. DOI: 10.1021/la400533u
37. Gaputo G., Cortese B., Nobile C., Salerno M., Athanassiou A. Reversibly lightswitchable wettability of hybrid organic/inorganic surfaces with dual micro-/nanoscale roughness. *Advanced Functional Materials*. 2009. Vol. 19. Iss. 8. Pp. 1149–1157. DOI: 10.1002/adfm.200800909
38. Hu J., Gao Q., Xu L., Wang M., Zhang M., Zhang K., Lui W., Wu G. Functionalization of cotton fabrics with highly durable polysiloxane-TiO₂ hybrid layers: potential applications for photo-induced water-oil separation, UV shielding, and selfcleaning. *Journal of Materials Chemistry A*. 2018. Vol. 6. Iss. 14. Pp. 6085–6095. DOI: 10.1039/C7TA11231A
39. Liu F., Urban M.W. Recent advances and challenges in designing stimuli-responsive polymers. *Progress in Polymer Science*. 2010. Vol. 35. Iss. 1–2. Pp. 3–23. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2009.10.002
40. Roy D., Cambre J. N., Sumerlin B.S. Future perspectives and recent advances in stimuli-responsive materials. *Progress in Polymer Science*. 2010. Vol. 35. Iss. 1–2. Pp. 278–301. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2019.10.008
41. Lee H.-I., Pietrasik J., Sheiko S.S., Matyjaszewski K. Stimuli-responsive molecular brushes. *Progress in Polymer Science*. 2010. Vol. 35. Iss. 1–2. Pp. 24–44. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2009.11.002
42. Wang D., Jin Y., Zhu X., Yan D. Synthesis and applications of stimuli-responsive hyperbranched polymers. *Progress in Polymer Science*. 2017. Vol. 64. Pp. 114–153. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2016.09.005
43. Guo F., Guo Z. Inspired smart materials with external stimuli responsive wettability: a review. *RSC Advances*. 2016. Vol. 6. Iss. 43. Pp. 36623–36641. DOI: 10.1039/C6RA04079A
44. Chang B., Zhang B., Sun T. Smart polymers with special wettability. *Small*. 2017. Vol. 13. Iss. 4. Art. Num. 1503472. DOI: 10.1002/sml.201503472
45. Hu J., Meng H., Li G., Ibekwe S.I. A review of stimuli-responsive polymers for smart textile applications. *Smart Materials and Structures*. 2012. Vol. 21. Iss. 5. Art. Num. 053001. DOI: 10.1088/0964-1726/21/5/053001
46. Zhai L. Stimuli-responsive polymer films. *Chemical Society Review*. 2013. Vol. 42. Iss. 17. Pp. 7148–7160. DOI: 10.1039/c3cs60023h
47. Sun T., Wang G., Feng L., Liu B., Ma Y., Jiang L., Zhu D. Reversible Switching between Superhydrophilicity and Superhydrophobicity. *Angewandte Chemie International Edition*. 2004. Vol. 43. Iss. 3. Pp. 357–360. DOI: 10.1002/anie.200352565
48. Fu Q., Rama Rao G.V., Basame S.B., Keller D.J., Artyushkova K., Fulghum J.E., Lopez G.P. Reversible control of free energy and topography of nanostructured surfaces. *Journal of the American Chemical Society*. 2004. Vol. 126. Iss. 29. Pp. 8904–8905. DOI: 10.1021/ja047895q
49. Chen L., Liu M., Lin L., Zhang T., Ma J., Song Y., Jiang L. Thermal-responsive hydrogel surface: tunable wettability and adhesion to oil at the water/solid interface. *Soft Matter*. 2010. Vol. 6. Iss. 12. Pp. 2708–2712. DOI: 10.1039/C002543G

50. Byun J., Shin J., Kwon S., Jang S., Kim J.K. Fast and reversibly switchable wettability induced by a photothermal effect. *Chemical Communications*. 2012. Vol. 48. Iss. 74. Pp. 9278–9280. DOI: 10.1039/c2cc34601j
51. Zhang D., Cheng Z., Kang H., Yu J., Liu Y., Jiang L. A smart superwetting surface with responsiveness in both surface chemistry and microstructure. *Angewandte Chemie*. 2018. Vol. 130. Iss. 14. Pp. 3763–3767. DOI: 10.1002/ange.201800416
52. Tang T., Castelletto V., Parras P., Hamley I.W., King S.M., Roy D., Perrier S., Hoogenboom R., Schubert U.S. Thermo-responsive Poly (methyl methacrylate)-block-poly(N-isopropylacrylamide) Block Copolymers Synthesized by RAFT Polymerization: Micellization and Gelation. *Macromolecular Chemistry and Physics*. 2006. Vol. 207. Iss. 19. Pp. 1718–1726. DOI: 10.1002/macp.200600309
53. Li J.-J., Zhu L.-T., Luo Z.-H. Electrospun fibrous membrane with enhanced switchable oil/water wettability for oily water separation. *Chemical Engineering Journal*. 2016. Vol. 287. Pp. 474–481. DOI: 10.1016/j.cej.2015.11.057
54. Ou R., Wei J., Jiang L., Simon G.P., Wang H. Robust thermoresponsive polymer composite membrane with switchable superhydrophilicity and superhydrophobicity for efficient oil–water separation. *Environmental Science & Technology*. 2016. Vol. 50. Iss. 2. Pp. 906–914. DOI: 10.1021/acs.est.5b03418
55. Kim S., Choi H. Switchable wettability of thermoresponsive core–shell nanofibers for water capture and release. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2019. Vol. 7. Iss. 24. 19870–19879. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b05273
56. Zhang Q., Lei L., Zhu S. Gas-responsive polymers. *ACS Macro Letters*. 2017. Vol. 6. Iss. 5. Pp. 515–522. DOI: 10.1021/acsmacrolett.7b00245
57. Che H., Huo M., Peng L., Fang T., Liu N., Feng L., Wei Y., Yan J. CO₂-responsive nanofibrous membranes with switchable oil/water wettability. *Angewandte Chemie International Edition*. 2015. Vol. 54. Iss. 31. Pp. 8934–8938. DOI: 10.1002/anie.201501034
58. Bhushan B., Nosonovsky M. The rose petal effect and the modes of superhydrophobicity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2010. Vol. 368. Iss. 1929. Pp. 4713–4728. DOI: 10.1098/rsta.2010.0203
59. Bhushan B., Her E.K. Fabrication of superhydrophobic surfaces with high and low adhesion inspired from rose petal. *Langmuir*. 2010. Vol. 26. Iss. 11. Pp. 8207–8217. DOI: 10.1021/la904585j
60. Yong J., Chen F., Yang Q., Zhang D., Du G., Si J., Yun F., Hou X. Femtosecond laser weaving superhydrophobic patterned PDMS surfaces with tunable adhesion. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2013. Vol. 117. Iss. 47. Pp. 24907–24912. DOI: 10.1021/jp408863u
61. Wang C., Shao R., Wang G., Sun S. Hierarchical hydrophobic surfaces with controlled dual transition between rose petal effect and lotus effect via structure tailoring or chemical modification. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. Vol. 622. Art. Num. 126661. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126661
62. Mukhopadhyay R.D., Vedhanarayanan B., Ajayaghosh A. Creation of «Rose Petal» and «Lotus Leaf» Effects on Alumina by Surface Functionalization and Metal-Ion Coordination. *Angewandte Chemie International edition*. 2017. Vol. 56. Iss. 50. Pp. 16018–16022. DOI: 10.1002/anie.201709463
63. Park J.K., Yang Z., Kim S. Black silicon/elastomer composite surface with switchable wettability and adhesion between lotus and rose petal effects by mechanical strain. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. Vol. 9. Iss. 38. Pp. 33333–33340. DOI: 10.1021/acsami.7b11143
64. Tang X., Zhu P., Tian Y., Zhou X., Kong T., Wang L. Mechano-regulated surface for manipulating liquid droplets. *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. Art. Num. 14831. DOI: 10.1038/ncomms14831
65. Berson J., Moosmann M., Walheim S., Schimmel T. Mechanically induced switching of molecular layers. *Nano Letters*. 2019. Vol. 19. Iss. 2. Pp. 816–822. DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b03987
66. Bristov D., Demarko R.M. Chitosan-covered hydrophobic glass and of its production. Patent RF, no. 2010142412/03, 2013.
67. Choate T.F. Polyurethane dentrite coating. Patent RF, no. 2011102479/05, 2009.
68. Gorshkova O.V., Gol'din V.V., Kondrat'ev D.N. Composition for giving surface properties of self-cleaning based on lotus effect. Patent RF, no. 2011150422/05, 2011.

Information about the authors

Bukovtsova, Aleksandra I. PhD, assistant professor of the department of construction and operation of mining and metallurgical complexes. E-mail: 9507131581@mail.ru. Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of the FSAEI HE «National University of Science and Technology «MISIS» (STI NITU MISIS). Russia, 309516, Sary Oskol, microdistrict Makarenko, 42.

Netsvet, Daria D. PhD, assistant professor of the department of construction and operation of mining and metallurgical complexes. E-mail: netsvet_dd@mail.ru. Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of the

FSAEI HE «National University of Science and Technology «MISIS» (STI NITU MISIS). Russia, 309516, Stary Oskol, microdistrict Makarenko, 42.

Zhernovskaya, Irina V. Senior lecturer, Department of Advanced Mathematics. E-mail: ziv_1111@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia, 308012, Belgorod, Kostukov St., 46.

Received 21.06.2024

Для цитирования:

Буковцова А.И., Нецвет Д.Д., Жерновская И.В. Анализ механизмов самоочищения в материалах строительного назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 1. С. 100–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-100-116

For citation:

Bukovtsova A.I., Netsvet D.D., Zhernovskaya I.V. Analysis of self-cleaning mechanisms in construction materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 1. Pp. 100–116. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-100-116