

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 544.70.023.2

DOI 10.46973/0201–727X_2026_1_8

*Т. Р. Кадыров, Т. В. Нужная, Ю. А. Полагутина, Э. Х. Халитова***СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ГИДРОФОБИЗАЦИИ МАТЕРИАЛОВ:
ХИМИЧЕСКИЕ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ
ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Аннотация. Представлен обзор современных методов гидрофобизации материалов, направленных на повышение долговечности и надёжности элементов железнодорожной инфраструктуры в условиях воздействия влаги и агрессивных факторов окружающей среды. Рассмотрены принципы формирования гидрофобных покрытий, механизмы действия гидрофобных растворов и методы оценки гидрофобности с использованием краевого угла смачивания. Особое внимание уделено микробиологическим подходам к гидрофобизации, основанным на применении микроорганизмов и синтезируемых ими биополимеров. Проанализированы области практического применения гидрофобных материалов при защите металлических конструкций, бетонных и железобетонных элементов, а также материалов верхнего строения пути от коррозии, влагонасыщения и биоповреждений. Отдельно рассмотрены экологические аспекты использования биосурфактантов и перспективы внедрения экологически безопасных гидрофобных покрытий в железнодорожной отрасли.

Ключевые слова: гидрофобизация материалов, железнодорожная инфраструктура, гидрофобные покрытия, материалы верхнего строения пути; краевой угол смачивания, микробиологические методы, биосурфактанты, защита от влаги, экологически безопасные технологии.

Для цитирования: Современные методы гидрофобизации материалов: химические и микробиологические решения для железнодорожной инфраструктуры / Т. Р. Кадыров, Т. В. Нужная, Ю. А. Полагутина, Э. Х. Халитова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 8–19. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_1_8.

Введение

Проблема пагубного влияния влаги на различного рода материалы остаётся актуальной уже на протяжении долгого времени, особенно в условиях эксплуатации объектов железнодорожной инфраструктуры. Попадая в поры или пустоты, вода начинает растворять те составляющие, которые растворимы, следовательно, её воздействие может стать разрушающим для ряда конструкций [1]. Это проявляется в виде снижения прочности материалов, развития биокоррозии, образования высолов и других нежелательных процессов, что отрицательно сказывается как на внешнем виде, так и на эксплуатационных характеристиках конструкции.

Особое внимание при этом уделяется методам защиты строительных материалов от избыточного увлажнения, среди которых особое место занимает гидрофобизация – придание поверхности материала водоотталкивающих свойств. Гидрофобизация позволяет значительно повысить стойкость материалов к капиллярному водопоглощению, предотвращает проникновение воды внутрь конструкции и увеличивает срок службы сооружений [1]. Современные технологии в этой области включают использование органосилоновых, силоксановых и других составов, образующих тонкие слои на поверхности материала без изменения его паропроницаемости, что особенно важно для конструкций мостов и тоннелей.

На смачивание влияют различные характеристики самих материалов. Одним из важнейших факторов является пористая структура: размер пор, их расположение и распределение оказывают значительное влияние на степень смачивания [2]. Многие исследования направлены на изучение возможности изменения пористой структуры материала, чтобы улучшить его эксплуатационные характеристики. Химический состав и свойства поверхности также играют важную роль. Определённые молекулы, находящиеся на поверхности материала, могут влиять на его взаимодействие с жидкостями, делая его более гидрофильным или, наоборот, гидрофобным. Исходя из всего этого появляется необходимость целенаправленно изменять уже имеющиеся характеристики некоторых материалов, чтобы увеличить срок их эксплуатации и улучшить качество [2].

В последние годы всё большее внимание уделяется биологическим методам модификации поверхностей, основанным на использовании микроорганизмов. Особый интерес вызывают гидрофобные и гидрофильные свойства микроорганизмов, поскольку они могут быть использованы для создания защитных покрытий или активизации смачивания материалов. Гидрофобность клеточной поверхности (ГКП) микроорганизмов определяется наличием специфических компонентов клеточной стенки, таких как липополисахариды, белки, полисахариды и поверхностно-активные вещества (ПАВ), выделяемые самими микроорганизмами. Например, *Bacillus subtilis* продуцирует липопептиды, такие как сурфактин, которые обладают высокой поверхностной активностью и могут снижать поверхностное натяжение воды, тем самым изменяя гидрофобные свойства твёрдых поверхностей [3].

Исследования показали, что ГКП напрямую влияет на их адгезию к различным материалам. Адгезия микроорганизмов к поверхностям – первый этап формирования биоплёнки. Этот этап адгезии во многом определяется физико-химическими взаимодействиями, в первую очередь силами Лифшица – ван дер Ваальса, кислотно-основными и электростатическими взаимодействиями. Эти взаимодействия зависят от физико-химических свойств, в том числе от гидрофобности, электростатического заряда и характеристик доноров и акцепторов электронов. Микроорганизмы с выраженной ГКП демонстрируют более высокую способность к прилипанию к гидрофобным поверхностям, таким как пластмассы или обработанные силанами строительные материалы [4]. Это свойство может быть использовано для создания защитных биопленок, которые снижают проникновение воды в пористые материалы, например, в кирпич или бетон. Напротив, гидрофильные микроорганизмы лучше взаимодействуют с полярными поверхностями, такими как стекло или оксидированные металлы, что позволяет использовать их в процессах, требующих улучшенного смачивания [5].

Кроме того, гидрофобные свойства микроорганизмов могут быть модифицированы под действием внешних факторов, таких как pH среды, наличие ионов металлов или органических добавок. Например, добавление Ca^{2+} может усиливать ГКП за счёт изменения заряда клеточной стенки и формирования комплексов с анионными группами. Также известно, что некоторые штаммы бактерий могут изменять свои поверхностные свойства в ответ на условия окружающей среды, что делает их потенциально полезными в адаптивных системах защиты материалов от влаги [6].

Таким образом, интеграция химических и микробиологических методов гидрофобизации представляет собой перспективное направление повышения долговечности и эксплуатационной надёжности объектов железнодорожной инфраструктуры. Реализация данных подходов позволяет снизить влагопроницаемость конструкций, минимизировать применение агрессивных реагентов и обеспечить экологически безопасную защиту материалов в условиях интенсивной эксплуатации.

Физико-химические и биологические принципы гидрофобности

Именно поэтому широкое распространение получил метод гидрофобизации. Это процесс снижения способности материалов пропускать воду, путём применения специальных растворов.

Гидрофобизация используется в следующих целях:

- предотвращение проникновения влаги в структуру материала;
- повышение теплоизоляционных свойств материала;
- защита конструкции от коррозии;
- повышение морозостойкости;
- предупреждение развития микроорганизмов;
- повышение прочности материала [7].

Степень гидрофобности и гидрофильности поверхности определяет краевой угол смачивания. Это угол между касательной к поверхности капли жидкости и поверхностью твёрдого материала в точке их контакта [8]. Если краевой угол смачивания составляет менее 90 градусов, то поверхность считается гидрофильной (т.е. хорошо смачивается). Если же краевой угол больше 90 градусов, то поверхность гидрофобная (т.е. не смачивается водой, а капля принимает более сферическую форму). Также краевой угол может составлять более 150 градусов, в данном случае поверхность будет считаться сверхгидрофобной [9].

ГКП – биофизический параметр, влияющий на адгезию грибковых клеток или спор к биотическим и абиотическим поверхностям, другими словами, это способность микроорганизмов отталкивать воду, которая определяется структурой и химическим составом внешних слоёв клеточной стенки, таких как белки, липополисахариды, тейхоевые кислоты и экзополисахариды. Гидрофобность играет ключевую роль в процессах прилипания, формирования биопленок, патогенности и взаимодействия с окружающей средой [10]. У диморфных грибов множество факторов, в том числе вызванный темпера-

турой переход между плесневой и дрожжевой формами, сильно влияют на ГКП: более высокая гидрофобность чаще встречается при более низких температурах, способствующих росту нитевидных клеток [11]. Некоторые штаммы *Cryptococcus neoformans* демонстрируют высокую ГКП, несмотря на наличие гидрофильной капсулы. Различия в морфологии отдельных колоний дрожжей из одного и того же изолята могут быть связаны с различиями в ГКП. Эти различия в ГКП часто связаны с изменением вирулентности у патогенных грибов и могут влиять на эффективность противогрибковой терапии. *Cryptococcus neoformans* и *Cryptococcus gattii* – патогенные грибы, вызывающие значительную заболеваемость и смертность. В исследовании [12] было показано, что *C. neoformans* окружен полисахаридной капсулой, которая является высокогидрофильной и играет важную роль в определении вирулентности. В своем исследовании они сообщили о значительных различиях в гидрофобности некоторых штаммов *C. neoformans* и *C. gattii*. Капсульные полисахариды штаммов *C. neoformans* различаются по повторяющимся мотивам и, следовательно, по количеству гидроксильных групп, что, наряду со структурой капсулы более высокого порядка, может вносить вклад в различия в гидрофобности. Механизмы поддержания ГКП у патогенных грибов изучены недостаточно, но понимание этого фундаментального клеточного параметра важно для изучения его влияния на такие явления, как образование биопленок и вирулентность [13].

Различают два основных типа супергидрофобных поверхностей биопленок: «розоводобные», где капли жидкости прилипают при наклоне из-за сильного сцепления с поверхностью, и «лотосоводобные», где капли легко скатываются благодаря минимальному взаимодействию. Эти различия обусловлены структурой поверхности – в случае «лотоса» между каплями и биопленкой сохраняются микроскопические воздушные карманы, тогда как у «розы» жидкость контактирует непосредственно с поверхностью. Механизм гидрофобности биопленок *B. subtilis* связан с особенностями их матрицы, содержащей три ключевых компонента: гидрофобин (BslA), формирующий водоотталкивающее поверхностное покрытие; экзополисахариды, обеспечивающие структурную целостность; и волокна TasA, придающие механическую прочность. Комбинация химического состава (гидрофобные белки) и физической структуры (микро- и наноструктурность) определяет устойчивость к смачиванию. В борьбе с биопленками традиционно используют ферментативное разрушение матрицы или применение антител и биологических макромолекул, однако эти методы дорогостоящи и специфичны для определенных штаммов. Более универсальным подходом является воздействие на гидрофобные свойства, например обработка концентрированными растворами солей или сахаров, что снижает водоотталкивающие свойства, но требует много времени (до 48 часов) и может вызывать побочные эффекты. Перспективным методом представляется использование ионов металлов: исследования показали, что низкие концентрации Cu^{2+} и Zn^{2+} снижают экспрессию генов, ответственных за формирование матрицы, изменяют топографию поверхности биопленки и увеличивают смачиваемость, делая биопленку уязвимой к антибиотикам. Важно отметить, что этот эффект наблюдается даже на зрелых биопленках, когда ионы металлов диффундируют через субстрат. Таким образом, регулирование гидрофобности поверхности биопленок, особенно с помощью ионов металлов в низких концентрациях, представляет собой экономичный и эффективный метод борьбы с биопленками как на ранних, так и на поздних стадиях их формирования [14].

Классификация гидрофобизаторов

Химические растворы

Для защиты различных элементов от воды применяются гидрофобные растворы (гидрофобизаторы). В зависимости от способа применения гидрофобизаторы подразделяются на:

- поверхностно-активные;
- порошковые.

Порошковые гидрофобизаторы применяются при изготовлении материала в качестве добавки для сухих смесей. Они вносятся в составы и при добавлении воды активируются и вступают во взаимодействие с материалом. Затем частицы гидрофобизатора соединяются с поверхностью наполнителя и формируют водоотталкивающий слой.

Поверхностно-активные гидрофобизаторы обладают способностью изменять поверхностные свойства материала. Это растворы, которые при нанесении на материал образуют водоотталкивающую пленку, которая не пропускает воду внутрь.

Биологические гидрофобизаторы

Современные исследования выявили перспективность бактериальных штаммов в роли биологических гидрофобизаторов. В отличие от традиционных химических гидрофобизаторов (например,

силиконов или фторсодержащих соединений), биологические методы используют метаболическую активность микроорганизмов для создания устойчивых к воде поверхностей. Бактерии являются одним из основных и важнейших компонентов природной экосистемы, выполняющим значительную работу на макроуровне [15]. Они обитают в самых разных местах: от высоких гор до глубинных слоёв океана, от холодных ледяных земель до высокотемпературных вулканических регионов, демонстрируя уникальную адаптивность. Бактерии существуют либо в виде отдельных клеток (планктонных клеток), либо в виде биоплёнок – сложных трёхмерных многослойных структур, образованных множеством бактериальных клеток, которые выделяют внеклеточные полимерные вещества (ВПВ) на различных поверхностях [16].

Биоплёнки обладают рядом ключевых свойств, делающих их перспективными для гидрофобизации. Все биоплёнки имеют тенденцию к специфическому или неспецифическому взаимодействию с поверхностями, что обеспечивает прочную адгезию. Они состоят из внеклеточных полимерных веществ, создающих уникальную трёхмерную структуру с микросредой, подходящей для роста микроорганизмов [15, 17, 18].

В зависимости от условий биоплёнки приобретают различную архитектуру (грибовидную, плоскую, столбчатую) и обладают вязкоупругими свойствами, защищающими бактерии от механических воздействий. Важно, что гидрофобность микроорганизмов может варьироваться в зависимости от структуры их клеточной поверхности и условий среды, таких как температура, наличие питательных веществ и фаза роста [12, 19]. Например, у *Streptococcus pyogenes* экспрессия М-белков и наличие липотейхоевых кислот положительно коррелируют с гидрофобностью и образованием биоплёнок [18, 20, 21].

Как у химических, так и у биологических гидрофобизаторов есть свои преимущества и недостатки, определяющие сферу их применения. Химические покрытия отличаются высокой эффективностью и быстрым действием, обеспечивая мгновенную защиту от влаги, коррозии и микробов. Однако их существенный минус – токсичность, которая может негативно влиять на окружающую среду и здоровье человека, что ограничивает их использование в экологически ответственных проектах. Биологические гидрофобизаторы, такие как бактериальные биоплёнки, предлагают более устойчивое и природосовместимое решение. Их главные плюсы – способность к саморегенерации, экологичность и долговечность, поскольку они формируют естественный защитный барьер. Тем не менее такие покрытия требуют времени для образования, чувствительны к внешним условиям и работают медленнее, чем химические аналоги. Кроме того, рынок биологических гидрофобизаторов пока развит слабо, что затрудняет их массовое применение.

Таким образом, выбор между химическими и биологическими покрытиями зависит от конкретных задач: если нужна мгновенная защита, предпочтение отдаётся химическим составам, а если важны экологичность и долгосрочный эффект – биологическим, несмотря на их более сложные условия использования.

Отраслевое применение

Среди наиболее перспективных направлений применения бактериальных гидрофобизаторов выделяют несколько ключевых подходов. Во-первых, это использование бактерий, продуцирующих биоплёнки с гидрофобными свойствами. Некоторые штаммы, такие как *Bacillus subtilis* и *Pseudomonas aeruginosa*, способны образовывать биоплёнки с выраженной гидрофобностью, которые могут применяться для покрытия строительных материалов, текстиля и древесины. Интересно, что у *B. subtilis* гидрофобность биоплёнки может регулироваться внешними факторами: добавление ионов меди или цинка делает супергидрофобные биоплёнки полностью смачиваемыми. Во-вторых, перспективно использование микробных липопептидов и ПАВ с гидрофобным эффектом [10, 22]. Бактерии рода *Bacillus* и *Streptomyces* производят липопептиды (например, сурфактин, итурин), которые помимо амфифильных свойств могут придавать поверхности длительную гидрофобность. Такие соединения экологически безопасны и могут применяться в «зелёной» химии [22]. *Pseudomonas putida* колонизирует корни растений, образуя биоплёнки, в которых белки LapA и LapF играют ключевую роль, причём LapA способен связываться как с гидрофильными, так и с гидрофобными поверхностями. Однако роль LapF в адгезии к гидрофобным субстратам остаётся неизученной, несмотря на его важность в формировании зрелой биоплёнки [23].

Особый интерес представляет гидрофобизация минеральных материалов через микробиологические процессы. Технология MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation) с использованием уретазных бактерий *Sporosarcina pasteurii* позволяет не только усиливать прочность бетона за счёт микробиологического окаменения, но и повышать его водоотталкивающие свойства благодаря образованию

карбонатных осадков на поверхности. Это открывает широкие возможности для применения в строительстве и реставрации памятников. Биогидрофобизаторы всё чаще рассматриваются как эффективная защита от капиллярного подсоса воды, что особенно важно для предотвращения разрушения камня и кирпича в условиях повышенной влажности.

Таким образом, бактериальные гидрофобизаторы представляют собой перспективную экологичную альтернативу традиционным химическим методам. Их преимущества включают биоразлагаемость, multifunctionality и возможность тонкой настройки свойств за счёт выбора конкретных штаммов микроорганизмов. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на оптимизацию подбора штаммов для конкретных материалов, повышение устойчивости биоплёнок к внешним воздействиям и разработку методов масштабирования технологий для промышленного применения [19, 12, 24].

Металлы и сплавы

Сверхгидрофобные растворы нашли своё применение в качестве средства борьбы с коррозией металла. Значительное внимание уделяется покрытию нержавеющей стали данным материалом. Даже с учётом своей высокой устойчивости к коррозии, нержавеющая сталь может подвергнуться пагубному воздействию воды [25]. Применение наиболее популярных способов защиты от коррозии, таких как: изменение химического состава материала, покрытие материалами с высокой химической стойкостью, применение ингибиторов коррозии, – затрудняется необходимостью сохранения структуры металла, его функциональности и внешних составляющих [26]. Сверхгидрофобное покрытие имеет значительное преимущество перед ранее используемыми методами за счёт возможности обеспечения надёжного антикоррозионного покрытия при минимальном последующем обслуживании.

Одной из основных проблем, касающихся элементов железнодорожного пути, является коррозия, которая является следствием воздействия атмосферных осадков, а также контакта с влагой и реагентами. Несмотря на то, что гидрофобные покрытия активно исследуются применительно к нержавеющей стали, их применение является перспективным для защиты элементов верхнего строения пути и металлоконструкций от коррозии. К таковым можно отнести: рельсовые скрепления, болты и шайбы и элементы стрелочных переводов. В то же время применение подобного рода покрытий ограничено на рабочей поверхности рельса в силу высокой интенсивности механического износа.

Строительные материалы

Гидрофобные растворы также применяются для обработки бетона в целях предотвращения разрушения и коррозии. Так как бетон сам по себе обладает гидрофильными и абсорбирующими свойствами из-за своей пористой структуры, ему необходима дополнительная защита от воды для продления срока службы. Обработка может происходить разными методами: покрытием, закупоркой пор и гидрофобной пропиткой. В первом случае на поверхность бетона наносится покрытие, представляющее собой сплошной защитный слой, который создаёт физический барьер на поверхности бетона. Во втором случае в процессе закупорки пор происходит их заполнение нерастворимыми соединениями, в результате чего снижается пористость поверхности и укрепляется верхний слой бетона. Самым распространённым средством для обработки пор является силикат натрия. При гидрофобной пропитке на внутренней поверхности материала образуется тонкая плёнка, которая придаёт ему водоотталкивающие свойства. Преимущество гидрофобной пропитки заключается в том, что она не воздействует на паро- и газопроницаемость бетона, предотвращая попадание в него воды, что позволяет материалу снижать внутреннюю влагу [27].

Гидрофобная обработка также применима к железобетону, так как основной причиной его разрушения является коррозия стальных элементов конструкции. Сама по себе сталь в бетоне находится в щелочной среде, поэтому не подвергается коррозии, так как на её поверхности образуется защитная плёнка. Однако увеличение количества проникаемого углекислого газа в структуру бетона или большое количество хлорид-ионов, которые могут попасть на бетон вследствие использования реагентов против гололёда или под воздействием морской воды, могут разрушить защитный слой [28]. В целях безопасной защиты железобетона от разрушения применяют наногидрофобные агенты в виде водной эмульсии. Данная добавка значительно снижает адсорбцию воды, а также подавляет перенос хлорид-ионов, за счёт уменьшения испарения воды [29].

В железнодорожном строительстве гидрофобная обработка бетона подходит прежде всего для искусственных сооружений, таких как: мосты, путепроводы, тоннели и водопропускные трубы, которые работают в условиях постоянного увлажнения. Применение гидрофобизаторов приведет к снижению водопоглощения, что замедлит процесс карбонизации и коррозии арматуры. В свою очередь для

железобетонных шпал пропитка может рассматриваться как дополнительная мера повышения морозостойкости, однако коррозия арматуры не является основным фактором их выхода из строя.

Применение гидрофильных и гидрофобных микроорганизмов в обработке древесины

Активно применяются гидрофобные покрытия для обработки древесины. Древесина – один из самых востребованных строительных материалов, однако её уязвимость к биоразложению и влаге требует эффективных методов защиты. Она является экологичным материалом и обладает хорошими прочностными характеристиками. Если не использовать специальную защиту от влаги, то со временем она теряет свою прочность и подвергается гниению. В частности, железнодорожные шпалы, уложенные в путь, должны подвергаться обязательной обработке. Несмотря на то, что в большинстве своём эксплуатируются железобетонные шпалы, деревянные шпалы все ещё необходимы для определённых отрезков пути с особыми эксплуатационными условиями. Наиболее популярными пропитывающими средствами являются: креозотовое масло, каменноугольное масло и другие маслянистые составы. Однако проблема существующих применяемых пропиток заключается в их высоком уровне токсичности. Поэтому применение креозота постепенно сокращается, но не искореняется полностью, так как он, благодаря своей токсичности, справляется с микроорганизмами, разрушающими древесину [30]. Для увеличения гидрофобности материала применяют также порошок из диоксида кремния, который является менее токсичным, чем креозот. При этом чем больше производится циклов пропитки, тем больше становится угол смачивания, а соответственно увеличивается гидрофобность древесины. Кроме того, уменьшается её теплопроводность, что делает древесину более устойчивой к огню [31].

Традиционные химические пропитки, такие как соединения меди и борные антисептики, обладают высокой эффективностью, но их экологическая безопасность вызывает вопросы. В связи с этим всё большее внимание уделяется биотехнологическим методам, основанным на использовании гидрофильных и гидрофобных микроорганизмов.

Гидрофильные микроорганизмы (например, бактерии рода *Bacillus* и *Pseudomonas*) способны подавлять рост дереворазрушающих грибов за счёт синтеза антимикробных соединений. Гидрофобные микроорганизмы (например, грибы *Trichoderma* и *Aspergillus*) могут формировать водоотталкивающие биоплёнки, снижая водопоглощение древесины. *Trichoderma* продуцирует гидрофобины – небольшие белки, образующие водоотталкивающие слои на поверхности древесины. Исследования показали, что обработка древесины культурой *T. viride* снижает её водопоглощение на 20–30 %. *Aspergillus niger* синтезирует меланины – пигменты, обладающие гидрофобными свойствами. Комбинированное применение этих групп открывает новые возможности для создания экологичных и долговечных биопропиток.

Бактерии *Rhodococcus opacus* продуцируют триацилглицериды и другие липиды, которые придают древесине водоотталкивающие свойства. Эксперименты показали, что обработка *R. opacus* снижает капиллярное водопоглощение на 25–40 %.

Гидрофильные бактерии и грибы активно развиваются во влажной среде и могут использоваться для биоконсервации древесины. Их защитное действие основано на следующих механизмах: конкуренция за питательные вещества (некоторые микроорганизмы вытесняют патогены, лишая их ресурсов) и синтез антимикробных метаболитов (бактерии продуцируют вещества, подавляющие рост грибов и насекомых).

Например, бактерии рода *Bacillus* (*Bacillus subtilis* и *Bacillus amyloliquefaciens*) активно изучаются в качестве биозащитных агентов. Эти бактерии продуцируют липопептиды (сурфактин, итурин), которые обладают фунгицидной активностью против *Aspergillus*, *Penicillium* и других дереворазрушающих грибов. В исследовании, опубликованном в *International Biodeterioration & Biodegradation*, показано, что обработка древесины культурой *B. subtilis* снижает скорость её гниения на 40–60 % по сравнению с необработанными образцами [32].

Бактерии *Pseudomonas fluorescens* синтезируют сидерофоры – соединения, связывающие железо и лишаящие патогенные грибы важного питательного элемента. Кроме того, *P. fluorescens* продуцирует феназины, подавляющие развитие бурой гнили (*Serpula lacrymans*) и других дереворазрушающих видов. Актиномицеты (*Streptomyces* spp.) известны своей способностью продуцировать антибиотики широкого спектра действия. Например, *Streptomyces griseus* синтезирует стрептомицин, эффективный против ряда грибов, вызывающих гниение древесины.

Также современные разработки направлены на создание комплексных составов, сочетающих гидрофильные и гидрофобные микроорганизмы. Например, *Bacillus subtilis* + *Trichoderma harzianum* – обеспечивает защиту от грибов и снижает водопоглощение. *Pseudomonas putida* + наноцеллюлоза – улучшает механическую прочность и гидрофобность.

Таким образом, использование гидрофильных и гидрофобных микроорганизмов открывает новые возможности для создания экологичных и эффективных средств защиты древесины, в частности, деревянных шпал. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию составов, повышение их устойчивости и разработку промышленных технологий нанесения.

Перспективы дальнейшего развития

Необходимость защиты материалов от воздействия воды является распространённой проблемой во многих отраслях деятельности, включая железнодорожную инфраструктуру, элементы верхнего строения пути и искусственные сооружения. Применение гидрофобных растворов способствует значительному увеличению срока службы материалов, предотвращению коррозии и повышению их устойчивости к внешним воздействиям. Стоит отметить, что многочисленные исследования направлены на поиск и разработку именно экологичных гидрофобизаторов, так как большое количество существующих растворов и материалов обладают довольно высоким уровнем токсичности для окружающей среды. Наноструктурированные гидрофобные покрытия способствуют не только обеспечению достаточной влагозащиты, но и сохраняют основные эксплуатационные характеристики материалов. Дальнейшее исследование гидрофобных покрытий поможет изучить новые возможные сферы их применения, а также разработать более экологичные составы для минимизации вреда окружающей среде.

Современные исследования демонстрируют значительный потенциал гидрофильных и гидрофобных микроорганизмов для решения актуальных задач в различных областях науки и промышленности. В строительной индустрии особый интерес представляют работы по биозащите древесины. Исследование [33] подробно анализирует взаимосвязь между влажностью древесины и ее устойчивостью к грибковому разложению, предлагая новые подходы к биоконсервации. Важные результаты получены в работе [34], где систематизированы данные о взаимодействии древесины и дереворазрушающих грибов, а также рассмотрены современные методы биологической защиты.

Значительный прогресс достигнут в разработке биологических методов защиты строительных материалов. В работе [35] продемонстрировали эффективность использования антагонистических микроорганизмов против дереворазрушающих грибов, что открывает перспективы создания экологически безопасных консервантов. Практическое применение этих технологий показано в исследовании [36], где комбинация силанов и борной кислоты с биологическими компонентами продемонстрировала высокую эффективность против грибов и насекомых-вредителей. Перспективным направлением является разработка биогидрофобных составов, способных частично заменить токсичные креозотсодержащие пропитки, что особенно актуально на участках железнодорожного пути, где до сих пор эксплуатируются деревянные шпалы.

Дальнейшее развитие технологий сверхгидрофобных покрытий в отношении металлов и сплавов связано с их адаптацией к условиям эксплуатации железнодорожной инфраструктуры. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку износостойких антикоррозионных покрытий для элементов верхнего строения пути – рельсовых скреплений, болтовых соединений, шайб и элементов стрелочных переводов, работающих в условиях воздействия атмосферных осадков, влаги и противогололёдных реагентов.

Особое внимание должно быть уделено повышению адгезии покрытий к металлической поверхности и их устойчивости к динамическим нагрузкам. При этом применение сверхгидрофобных составов на рабочей поверхности рельса требует дальнейших исследований ввиду высокой интенсивности механического износа, что на данном этапе ограничивает их использование в зоне контакта колеса и рельса.

В области строительных материалов перспективы связаны с совершенствованием методов гидрофобной обработки бетона и железобетона, направленных на снижение водопоглощения и ограничение переноса агрессивных веществ в структуру материала. Актуальным направлением является оптимизация составов гидрофобных пропиток и наногидрофобных агентов, обеспечивающих уменьшение проникновения хлорид-ионов и замедление процессов карбонизации при сохранении паропроницаемости бетона.

Для объектов железнодорожного строительства – мостов, путепроводов, тоннелей и водопропускных сооружений – дальнейшие исследования должны быть направлены на оценку долговечности гидрофобных покрытий в условиях постоянного увлажнения и циклического замораживания и оттаивания. В отношении железобетонных шпал перспективным является изучение влияния гидрофобной пропитки на повышение морозостойкости и снижение водонасыщения бетона как дополнительной меры увеличения срока службы.

Список литературы

- 1 **Войтович, В. А.** Пособие по гидрофобизации строительных конструкций и изделий : учебно-методическое пособие / В. А. Войтович, И. Н. Хряпченкова ; Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород : ННГАСУ, 2016. – 45 с.
- 2 **Buczkowska, K.** Hydrophobic protection for building materials / K. Buczkowska // *Superhydrophobic Coating-Recent Advances in Theory and Applications*. – IntechOpen, 2023.
- 3 Comparison of methods to detect biosurfactant production by diverse microorganisms. *Journal of Microbiological Methods* / N. H. Youssef, K. E. Duncan, M. J. McInerney, M. J. Folmsbee. – 2004. – 56 (3). – P. 339–347. – DOI 10.1016/j.mimet.2003.11.001.
- 4 Adhesion behavior of *Escherichia coli* strains on glass : Role of cell surface qualitative and quantitative hydrophobicity in their attachment ability / K. Elfazazi, H. Zahir, S. Tankiouine [et al.] // *International Journal of Microbiology*. – 2021. – P. 1–9. – DOI 10.1155/2021/5580274.
- 5 The role of bacterial cell wall hydrophobicity in adhesion / M. C. M. van Loosdrecht, J. Lyklema, W. Norde [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology* 1987. – 53 (8). – P. 1893–1897.
- 6 Bacterial and fungal composition and exometabolites control the development and persistence of soil water repellency / E. N. Boak, B. P. Bowen, K. B. Louie [et al.] // *ISME Communications*. – 2025. – 5 (1). – DOI 10.1093/ismeco/ycaf084.
- 7 **Гетьман, Л. П.** Магистерская диссертация : Экспериментальная оценки эффективности гидрофобизации каменных материалов / Л. П. Гетьман. – Тольятти : Тольяттинский государственный университет, 2017. – 110 с.
- 8 **Marmur, A.** Solid-Surface Characterization by Wetting / A. Marmur // *Annual Review of Materials Research*. – 2009. – Vol. 39 (1). – P. 473–489.
- 9 **Родионова, Л. Д.** Применение гидрофобных и супергидрофобных покрытий для защиты от коррозии / Л. Д. Родионова, В. А. Брыксина // *Державинский форум*. – 2020. – Т. 4, № 16. – С. 154–162.
- 10 **Beshiru, A.** Biofilm formation and potential virulence factors of *Salmonella* strains isolated from ready-to-eat shrimps / A. Beshiru, I. H. Igbinosa, E. O. Igbinosa // *PLoS One*. – 2018. – Sep 20 ; 13 (9) : e0204345. – DOI 10.1371/journal.pone.0204345.
- 11 **Danchik, C.** Role of Cell Surface Hydrophobicity in the Pathogenesis of Medically-Significant Fungi / C. Danchik, A. Casadevall // *Front. Cell. Infect. Microbiol.* – 2021. – DOI 10.3389/fcimb.2020.594973.
- 12 Variation in cell surface hydrophobicity among

References

- 1 **Voytovich, V. A.** Manual on hydrophobization of building structures and products : educational and methodical manual / V. A. Voytovich, I. N. Khryapchenkova ; Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. – Nizhny Novgorod : NNGASU, 2016. – 45 p.
- 2 **Buczkowska, K.** Hydrophobic protection for building materials / K. Buczkowska // *Superhydrophobic Coating-Recent Advances in Theory and Applications*. – IntechOpen, 2023.
- 3 Comparison of methods to detect biosurfactant production by diverse microorganisms. *Journal of Microbiological Methods* / N. H. Youssef, K. E. Duncan, M. J. McInerney, M. J. Folmsbee. – 2004. – 56 (3). – P. 339–347. – DOI 10.1016/j.mimet.2003.11.001.
- 4 Adhesion behavior of *Escherichia coli* strains on glass : Role of cell surface qualitative and quantitative hydrophobicity in their attachment ability / K. Elfazazi, H. Zahir, S. Tankiouine [et al.] // *International Journal of Microbiology*. – 2021. – P. 1–9. – DOI 10.1155/2021/5580274.
- 5 The role of bacterial cell wall hydrophobicity in adhesion / M. C. M. van Loosdrecht, J. Lyklema, W. Norde [et al.] // *Applied and Environmental Microbiology* 1987. – 53 (8). – P. 1893–1897.
- 6 Bacterial and fungal composition and exometabolites control the development and persistence of soil water repellency / E. N. Boak, B. P. Bowen, K. B. Louie [et al.] // *ISME Communications*. – 2025. – 5 (1). – DOI 10.1093/ismeco/ycaf084.
- 7 **Getman, L. P.** Master's thesis : experimental evaluation of the effectiveness of hydrophobization of stone materials / L. P. Getman. – Tolyatti : Tolyatti State University, 2017. – 110 p.
- 8 **Marmur, A.** Solid-Surface Characterization by Wetting / A. Marmur // *Annual Review of Materials Research*. – 2009. – Vol. 39 (1). – P. 473–489.
- 9 **Rodionova, L. D.** Application of hydrophobic and superhydrophobic coatings for corrosion protection / L. D. Rodionova, V. A. Bryksina // *Derzhavin Forum*. – 2020. – Vol. 4, No. 16. – P. 154–162.
- 10 **Beshiru, A.** Biofilm formation and potential virulence factors of *Salmonella* strains isolated from ready-to-eat shrimps / A. Beshiru, I. H. Igbinosa, E. O. Igbinosa // *PLoS One*. – 2018. – Sep 20 ; 13 (9) : e0204345. – DOI 10.1371/journal.pone.0204345.
- 11 **Danchik, C.** Role of Cell Surface Hydrophobicity in the Pathogenesis of Medically-Significant Fungi / C. Danchik, A. Casadevall // *Front. Cell. Infect. Microbiol.* – 2021. – DOI 10.3389/fcimb.2020.594973.
- 12 Variation in cell surface hydrophobicity among

Cryptococcus neoformans strains influences interactions with amoebas / R. Vij, C. Danchik, C. Crawford [et al.]. – 2020. – DOI 10.1128/mSphere.00310-20.

13 SCOBY Cellulose-Based Materials Hydrophobized Using Stearic Acid and Apple Powder / M. A. Bryszewska, D. G. Pareja, L. Kaczmarek [et al.] // Int. J. Mol. Sci. 2024, 25, 13746. – DOI 10.3390/ijms252413746.

14 Metal ions weaken the hydrophobicity and antibiotic resistance of *Bacillus subtilis* / C. Falcón García, M. Kretschmer, C. N. Lozano-Andrade [et al.] // NCIB 3610 biofilms. npj Biofilms Microbiomes 6, 1 (2020). – DOI 10.1038/s41522-019-0111-8.

15 Bacterial biofilm shows persistent resistance to liquid wetting and gas penetration / A. K. Epstein, B. Pokroy, A. Seminara, J. Aizenberg // PNAS. – January 18, 2011. – Vol. 108, No. 3. – P. 997. – DOI 10.1073/pnas.1011033108.

16 **Kobayashi, K.** BslA(YuaB) forms a hydrophobic layer on the surface of *Bacillus subtilis* / K. Kobayashi, M. Iwano // Molecular Microbiology. – 2012. – 85 (1). – P. 51–66. – DOI 10.1111/j.1365-2958.2012.08094.

17 **Joshi, A. S.** Interactions of Gold and Silver Nanoparticles with Bacterial Biofilms / A. S. Joshi, P. Singh, I. Mijakovic // Molecular Interactions behind Inhibition and Resistance. Int. J. Mol. Sci. 2020, 21, 7658. – DOI 10.3390/ijms21207658.

18 The biofilm life cycle : expanding the conceptual model of biofilm formation / K. Sauer, P. Stoodley, D. M. Goeres, [et al.] // Nat Rev Microbiol 20, 608–620 (2022). – DOI 10.1038/s41579-022-00767-0.

19 Floating and Tether-Coupled Adhesion of Bacteria to Hydrophobic and Hydrophilic Surfaces / R. van der Westen, J. Sjollem, R. Molenaar [et al.] // Langmuir. – 2018. – 34. – P. 4937–4944. – DOI 10.1021/acs.langmuir.7b04331.

20 **Arnaouteli, S.** Just in case it rains : building a hydrophobic biofilm the *Bacillus subtilis* way / S. Arnaouteli, C. E. MacPhee, N. R. Stanley-Wall // Current Opinion in Microbiology. – 2016. – Vol. 34. – P. 7–12. – DOI 10.1016/j.mib.2016.07.012.

21 Relationship between Expression of the Family of M Proteins and Lipoteichoic Acid to Hydrophobicity and Biofilm Formation in *Streptococcus pyogenes* / H. S. Courtney, I. Ofek, T. Penfound [et al.]. – 2009. – DOI 10.1371/journal.pone.0004166.

22 *Lactobacillus plantarum* : Effect of a protective biofilm on the surface of olives during storage / K. Faten, K. Hamida, E. A. Soumya [et al.] // Sociedade Brasileira de Microbiologia. – 2015. – DOI 10.1016/j.bjm.2015.11.028.

23 LapF and Its Regulation by Fis Affect the Cell Surface Hydrophobicity of *Pseudomonas putida* /

Cryptococcus neoformans strains influences interactions with amoebas / R. Vij, C. Danchik, C. Crawford [et al.]. – 2020. – DOI 10.1128/mSphere.00310-20.

13 SCOBY Cellulose-Based Materials Hydrophobized Using Stearic Acid and Apple Powder / M. A. Bryszewska, D. G. Pareja, L. Kaczmarek [et al.] // Int. J. Mol. Sci. 2024, 25, 13746. – DOI 10.3390/ijms252413746.

14 Metal ions weaken the hydrophobicity and antibiotic resistance of *Bacillus subtilis* / C. Falcón García, M. Kretschmer, C. N. Lozano-Andrade [et al.] // NCIB 3610 biofilms. npj Biofilms Microbiomes 6, 1 (2020). – DOI 10.1038/s41522-019-0111-8.

15 Bacterial biofilm shows persistent resistance to liquid wetting and gas penetration / A. K. Epstein, B. Pokroy, A. Seminara, J. Aizenberg // PNAS. – January 18, 2011. – Vol. 108, No. 3. – P. 997. – DOI 10.1073/pnas.1011033108.

16 **Kobayashi, K.** BslA(YuaB) forms a hydrophobic layer on the surface of *Bacillus subtilis* / K. Kobayashi, M. Iwano // Molecular Microbiology. – 2012. – 85 (1). – P. 51–66. – DOI 10.1111/j.1365-2958.2012.08094.

17 **Joshi, A. S.** Interactions of Gold and Silver Nanoparticles with Bacterial Biofilms / A. S. Joshi, P. Singh, I. Mijakovic // Molecular Interactions behind Inhibition and Resistance. Int. J. Mol. Sci. 2020, 21, 7658. – DOI 10.3390/ijms21207658.

18 The biofilm life cycle : expanding the conceptual model of biofilm formation / K. Sauer, P. Stoodley, D. M. Goeres, [et al.] // Nat Rev Microbiol 20, 608–620 (2022). – DOI 10.1038/s41579-022-00767-0.

19 Floating and Tether-Coupled Adhesion of Bacteria to Hydrophobic and Hydrophilic Surfaces / R. van der Westen, J. Sjollem, R. Molenaar [et al.] // Langmuir. – 2018. – 34. – P. 4937–4944. – DOI 10.1021/acs.langmuir.7b04331.

20 **Arnaouteli, S.** Just in case it rains : building a hydrophobic biofilm the *Bacillus subtilis* way / S. Arnaouteli, C. E. MacPhee, N. R. Stanley-Wall // Current Opinion in Microbiology. – 2016. – Vol. 34. – P. 7–12. – DOI 10.1016/j.mib.2016.07.012.

21 Relationship between Expression of the Family of M Proteins and Lipoteichoic Acid to Hydrophobicity and Biofilm Formation in *Streptococcus pyogenes* / H. S. Courtney, I. Ofek, T. Penfound [et al.]. – 2009. – DOI 10.1371/journal.pone.0004166.

22 *Lactobacillus plantarum* : Effect of a protective biofilm on the surface of olives during storage / K. Faten, K. Hamida, E. A. Soumya [et al.] // Sociedade Brasileira de Microbiologia. – 2015. – DOI 10.1016/j.bjm.2015.11.028.

23 LapF and Its Regulation by Fis Affect the Cell Surface Hydrophobicity of *Pseudomonas putida* /

A. Lahesaare, H. Ainelo, A. Teppo [et al.] // PLoS ONE 11 (11) : e0166078. – 2016. – DOI 10.1371/journal.pone.0166078.

24 Contribution of Spores to the Ability of *Clostridium difficile* To Adhere to Surfaces / L. T. Joshi, D. S. Phillips, C. F. Williams [et al.] // Appl Environ Microbiol-78. – 2012. – DOI 10.1128/AEM.01862-12.

25 **Emelyanenko, K. A.** Laser obtained superhydrophobic state for stainless steel corrosion protection, a review / K. A. Emelyanenko, A. M. Emelyanenko, L. B. Boinovich // Coatings. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 194.

26 **Avdeev, Ya. G.** Inhibitory protection of steels from high-temperature corrosion in acid solutions. A review. Part 1 / Ya. G. Avdeev, Yu. I. Kuznetsov // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2020. – Vol. 9, No. 2. – P. 394–426. – DOI 10.17675/2305-6894-2020-9-2-2.

27 Recent advances in hydrophobic and icephobic surface treatments of concrete / R. Di Mundo [et al.] // Coatings. – 2020. – Vol. 10, No. 5. – P. 449.

28 Influence of a nano-hydrophobic admixture on concrete durability and steel corrosion / J. Cai [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 19. – P. 6842.

29 Hydrophobic or superhydrophobic modification of cement-based materials : A systematic review / J. Zhao [et al.] // Composites Part B : Engineering. – 2022. – Vol. 243. – P. 110104.

30 Incising and Double Impregnation of Beech Sleepers-Investigation of an Alternative Preservation System for Wooden Railway Sleepers / M. Starck [et al.] // Frontiers in Forests and Global Change. – 2022. – Vol. 5. – P. 814049.

31 Thermal insulation and hydrophobization of wood impregnated with silica aerogel powder / H. Chen [et al.] // Journal of Wood Science. – 2020. – Vol. 66. – P. 1–11.

32 The triterpenoid curcumene mediates the relative hydrophilicity of *Bacillus subtilis* spores / S. Castaldi, G. Donadio, I. Staiano [et al.]. – DOI 10.1128/mbio.03024-24.

33 **Brischke, C.** Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay / C. Brischke, G. Alfredsen // Applied Microbiology and Biotechnology, 104 (9), 3781–3795. – 2020. – DOI 10.1007/s00253-020-10479-1.

34 **Schmidt, O.** Wood and Tree Fungi / O. Schmidt // Biology, Damage, Protection and Use. Springer, Berlin. – 2006. – URL: <https://www.springer.com/gp/book/9783540321385>.

35 Biological control of wood decay fungi using antagonistic microorganisms / D. Jones [et al.] // Forest Products Journal. – 2020. – 70 (2). – P. 136–145. – DOI 10.13073/FPJ-D-19-00054.

36 A wood treatment based on siloxanes and boric

A. Lahesaare, H. Ainelo, A. Teppo [et al.] // PLoS ONE 11 (11) : e0166078. – 2016. – DOI 10.1371/journal.pone.0166078.

24 Contribution of Spores to the Ability of *Clostridium difficile* To Adhere to Surfaces / L. T. Joshi, D. S. Phillips, C. F. Williams [et al.] // Appl Environ Microbiol-78. – 2012. – DOI 10.1128/AEM.01862-12.

25 **Emelyanenko, K. A.** Laser obtained superhydrophobic state for stainless steel corrosion protection, a review / K. A. Emelyanenko, A. M. Emelyanenko, L. B. Boinovich // Coatings. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 194.

26 **Avdeev, Ya. G.** Inhibitory protection of steels from high-temperature corrosion in acid solutions. A review. Part 1 / Ya. G. Avdeev, Yu. I. Kuznetsov // International Journal of Corrosion and Scale Inhibition. – 2020. – Vol. 9, No. 2. – P. 394–426. – DOI 10.17675/2305-6894-2020-9-2-2.

27 Recent advances in hydrophobic and icephobic surface treatments of concrete / R. Di Mundo [et al.] // Coatings. – 2020. – Vol. 10, No. 5. – P. 449.

28 Influence of a nano-hydrophobic admixture on concrete durability and steel corrosion / J. Cai [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 19. – P. 6842.

29 Hydrophobic or superhydrophobic modification of cement-based materials : A systematic review / J. Zhao [et al.] // Composites Part B : Engineering. – 2022. – Vol. 243. – P. 110104.

30 Incising and Double Impregnation of Beech Sleepers-Investigation of an Alternative Preservation System for Wooden Railway Sleepers / M. Starck [et al.] // Frontiers in Forests and Global Change. – 2022. – Vol. 5. – P. 814049.

31 Thermal insulation and hydrophobization of wood impregnated with silica aerogel powder / H. Chen [et al.] // Journal of Wood Science. – 2020. – Vol. 66. – P. 1–11.

32 The triterpenoid curcumene mediates the relative hydrophilicity of *Bacillus subtilis* spores / S. Castaldi, G. Donadio, I. Staiano [et al.]. – DOI 10.1128/mbio.03024-24.

33 **Brischke, C.** Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay / C. Brischke, G. Alfredsen // Applied Microbiology and Biotechnology, 104 (9), 3781–3795. – 2020. – DOI 10.1007/s00253-020-10479-1.

34 **Schmidt, O.** Wood and Tree Fungi / O. Schmidt // Biology, Damage, Protection and Use. Springer, Berlin. – 2006. – URL: <https://www.springer.com/gp/book/9783540321385>.

35 Biological control of wood decay fungi using antagonistic microorganisms / D. Jones [et al.] // Forest Products Journal. – 2020. – 70 (2). – P. 136–145. – DOI 10.13073/FPJ-D-19-00054.

36 A wood treatment based on siloxanes and boric

acid against fungal decay and coleopter Hylotrupes bajulus / S. Palanti [et al.] // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2012. – No. 75. – P. 49–54. – DOI 10.1016/j.ibiod.2012.03.012.

acid against fungal decay and coleopter Hylotrupes bajulus / S. Palanti [et al.] // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2012. – No. 75. – P. 49–54. – DOI 10.1016/j.ibiod.2012.03.012.

T. R. Kadyrov, T. V. Nuzhnaya, Yu. A. Polagutina, E. Kh. Khalitova

**MODERN METHODS OF MATERIAL HYDROPHOBIZATION:
CHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL SOLUTIONS
FOR RAILWAY INFRASTRUCTURE**

Abstract. The article presents a review of modern methods of material hydrophobization aimed at increasing the durability and reliability of railway infrastructure elements under conditions of moisture exposure and aggressive environmental factors. The principles of hydrophobic coating formation, the mechanisms of action of hydrophobic solutions, and methods for assessing hydrophobicity using the contact angle measurement are considered. Particular attention is paid to microbiological approaches to hydrophobization based on the use of microorganisms and the biopolymers synthesized by them. The areas of practical application of hydrophobic materials in protecting metal structures, concrete and reinforced concrete elements, as well as track superstructure materials from corrosion, moisture saturation, and biodeterioration are analyzed. The environmental aspects of using biosurfactants and the prospects for implementing environmentally friendly hydrophobic coatings in the railway industry are also discussed.

Keywords: material hydrophobization, railway infrastructure, hydrophobic coatings, track superstructure materials, contact angle, microbiological methods, biosurfactants, moisture protection, environmentally friendly technologies.

For citation: Modern methods of material hydrophobization: chemical and microbiological solutions for railway infrastructure / T. R. Kadyrov, T. V. Nuzhnaya, Yu. A. Polagutina, E. Kh. Khalitova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 8–19. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_8.

Сведения об авторах

Кадыров Тимур Радикович

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Железнодорожный путь и строительство», старший преподаватель, e-mail: t.kadyrov@samgups.ru

Нужная Татьяна Владимировна

Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы, Уфимский институт биологии Уфимского Федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, e-mail: tanyawww89@mail.ru

Полагутина Юлия Анатольевна

Приволжский государственный университет путей сообщения (ПривГУПС), кафедра «Железнодорожный путь и строительство», студент 5-го курса, e-mail: yu.polagutina@samgups.ru

Information about the authors

Kadyrov Timur Radikovich

Volga State Transport University (PrivSTU), Chair “Railway Track and Construction”, Senior Lecturer, e-mail: t.kadyrov@samgups.ru

Nuzhnaya Tatyana Vladimirovna

Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla, Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, e-mail: tanyawww89@mail.ru

Polagutina Yulia Anatolievna

Privolzhsky State Transport University (PrivSTU), Chair “Railway Track and Construction”, 5th Year Student, e-mail: yu.polagutina@samgups.ru

Халитова Эльза Хафизовна

Башкирский государственный
педагогический университет
им. М. Акмуллы,
кандидат биологических наук,
заведующая научной лабораторией
«Биотехнология живых систем»,
e-mail: elza817@mail.ru

Khalitova Elza Khafizovna

Bashkir State Pedagogical University named
after M. Akmulla,
Candidate of Biological Sciences, Head of
the Scientific Laboratory “Biotechnology of
Living Systems”,
e-mail: elza817@mail.ru