

ИНГИБИТОРЫ КОРРОЗИИ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Г.Л. Олиференко^{1✉}, А.К. Грибанова¹, А.Н. Иванкин¹,
Р.К. Вагапов², А.В. Устюгов³

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

²ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ», Россия, 142717, Московская обл., г.о. Ленинский, п. Развилка, ул. Газовиков, зд. 15, стр. 1

³ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), Россия, 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78

oliferenko2@inbox.ru

Представлены материалы исследований по выбору ингибиторов коррозии на основе экстрактов коры древесины. Определены оптимальные условия получения экстрактов из коры сосны и коры ели. Водные экстракты коры сосны и коры ели изучены в качестве ингибиторов кислотной коррозии стали марки Ст3. Коррозионные испытания образцов стали проведены в условиях, моделирующих промышленную соляно-кислотную промывку и очистку варочного и теплообменного оборудования от накипи и отложений в целлюлозно-бумажной промышленности. Установлена высокая защитная эффективность предложенных зеленых ингибиторов.

Ключевые слова: коррозия металлов, ингибиторы коррозии, экологически безопасные зеленые ингибиторы, экстракты коры древесины

Ссылка для цитирования: Олиференко Г.Л., Грибанова А.К., Иванкин А.Н., Вагапов Р.К., Устюгов А.В. Ингибиторы коррозии на основе соединений растительного происхождения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 3. С. 156–168. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-3-156-168

Одной из самых распространенных проблем мировой экономики во многих отраслях является коррозия металлов, которая оказывает влияние как на оборудование, так и на производство в целом [1]. В связи с этим исследование коррозионных процессов и разработка методов защиты металлов от коррозии относятся к актуальным научно-техническим задачам. Кроме того, коррозия металлов приводит к огромным убыткам, поэтому разрешение существующей проблемы является важной задачей экономики [2]. Основным ущерб, причиняемый коррозией, заключается не только в потере металла как такового, но и в огромной стоимости изделий, разрушаемых коррозией. Истинные убытки от коррозии нельзя определить, оценив только прямые потери, в частности, стоимость разрушившейся конструкции, стоимость замены оборудования, затраты на мероприятия по защите от коррозии. Еще больший ущерб составляют косвенные потери — простой оборудования при замене разрушенных вследствие коррозии деталей и узлов, утечка продуктов, нарушение технологических процессов [1, 2].

Особое значение проблема коррозии металлов приобретает в таких отраслях, как химическое производство, теплоэнергетика, нефтегазовая промышленность, в которых оборудование функционирует при высоких значениях температуры и давления, а также в агрессивной среде [1–3]. Внутренней коррозии значительно подвергаются объекты транспортировки природного сырья (газопроводы и нефтепроводы), оборудование предприятий топливно-энергетического комплекса, химической и нефтехимической, лесной, целлюлозно-бумажной (ЦБП), гидролизной и лесохимической промышленности [3–5].

Такое технологическое оборудование предприятий химической переработки древесины, как варочные котлы и подогреватели варочного щелока для производства целлюлозы, реакторы для гидролиза древесины, реторты для пиролиза древесины, трубы и детали печной арматуры, теплообменники, испарители и другое при длительной эксплуатации подвергается коррозии под воздействием той или иной агрессивной среды (паров, газов, щелока, растворов кислот) [6–8].

Например, используемые для сульфатной варки целлюлозы моно- и биметаллические котлы (корпус из котельной стали марки 20К, защитный плакирующий слой из аустенитной

нержавеющей стали марки 10X18H10T или марки 10X17H13M2T) при длительной эксплуатации под воздействием щелока, парогазов и ингибированной соляной кислоты, применяемой для промывки котлов подвергаются коррозии — возникают потемнения, питтинги, язвы, растрескивания, развивается коррозия сварных швов и околошовных зон [7, 8]. Кроме того, нарушение устойчивого пассивного состояния обусловлено различными технологическими факторами варки целлюлозы — скачками температуры, давления и изменениями состава варочных растворов, выявление которых затруднено. Как известно, относительно простой в начале варки состав варочных растворов значительно усложняется к концу варок [7]. Производственные помещения варочных отделов, отбельных производств ЦБП также загрязнены агрессивными газами (SO_2 , Cl_2 и др.). Конденсация влаги на стальных конструкциях усиливает их коррозионное воздействие [9, 10]. Установлено, что активирующее воздействие на коррозию котельных марок стали в белом щелоке оказывают гидросульфид- (HS^-), сульфид- (S^{2-}), гидроксид-ионы (OH^-), а ингибиторный эффект проявляют силикат-ионы (SiO_3^{2-}) при концентрации 0,2...2 г/л; карбонат-ионы (CO_3^{2-}) уменьшают, а сульфит-ионы (SO_3^{2-}) с концентрацией 0,06...2,5 г/л влияют на скорость коррозии в малой степени. Хлорид-ионы совместно с тиосульфат- и сульфат-ионами активируют питтинговую коррозию аустенитной котельной стали марки 10X18H10T, причем влияние хлоридов в 4–5 раз сильнее [7, 10].

Самым агрессивным с точки зрения коррозии металлов является кислый сульфитный способ варки целлюлозы [8]. Установлено, что в этом случае основным агрессивным компонентом в технологических средах ЦБП является диоксид серы SO_2 [8].

В гидролизном производстве коррозионная активность технологической среды обусловлена преимущественно присутствием кислот (H_2SO_4 , HCl) и образующимися продуктами гидролиза [7, 11]. Причиной коррозии оборудования гидролизной промышленности может стать диоксид углерода CO_2 как один из продуктов гидролитического расщепления целлюлозы. В водном растворе диоксид углерода может находиться в растворенной форме, а также в виде недиссоциированных молекул угольной кислоты, гидрокарбонат-ионов (HCO_3^-) и карбонат-ионов (CO_3^{2-}). В этом случае вследствие электрохимического взаимодействия с поверхностью металла протекает так называемая уголекислотная коррозия [4].

Нагревание древесины без доступа кислорода приводит к ее термическому разложению

(пиролизу) с образованием разнообразных газообразных, жидких и твердых продуктов [12, 13]. При охлаждении эти продукты можно подразделить на водный слой (содержит метанол и уксусную кислоту) и древесную смолу, в состав которой входят спирты, фенолы, органические кислоты и др. Неконденсируемые газы содержат монооксид углерода (CO), диоксид углерода, метан, небольшие количества других углеводородов и водород. При пиролизе трубы печей, детали печной арматуры пиролизных установок, реторты пиролиза подвергаются газовой коррозии в результате химического взаимодействия с металлом [13]. В частности, в присутствии диоксида углерода при повышенных значениях температуры и давления происходит обезуглероживание стали и обеднение ее другими компонентами [1, 14]. Диоксид углерода оказывается опасным даже для никеля, особенно в присутствии сернистого газа и сероводорода. При высоких значениях температуры с диоксидом углерода также энергично взаимодействуют молибден и ниобий [1].

На нефтегазовых объектах, в трубопроводах проблемы коррозионного характера часто возникают вследствие повышенного содержания диоксида углерода CO_2 [4, 5]. Углекислотная коррозия является одним из основных разрушающих факторов при эксплуатации стальных трубных изделий [4, 5, 15]. Основная опасность данного вида коррозии состоит в том, что она носит локальный характер: на общем фоне равномерного растворения металла выделяются отдельные участки с наиболее интенсивной коррозией, что приводит к образованию глубоких (и даже сквозных) питтингов или коррозионных язв [15, 16]. В результате уголекислотной коррозии на поверхности металлической стенки оборудования образуются твердые отложения карбоната железа (II) (FeCO_3), которые выполняют функцию барьерных элементов и препятствуют дальнейшему развитию коррозионного процесса [14]. Однако при недостаточной эффективности и сплошности пленки карбоната железа (II) FeCO_3 коррозионные поражения стали при наличии CO_2 носят локальный характер и проявляются в виде питтингов и язв различных размеров. Локальная коррозия в этих местах может достигать нескольких миллиметров в год. В связи с этим проблеме коррозионных рисков в результате уголекислотной коррозии (УКК) и борьбе ней уделяется повышенное внимание.

Агрессивным газом, провоцирующим кислотную коррозию, также является сероводород H_2S . Растворяясь в воде, он образует слабую кислоту, которая может вызвать точечную

коррозию при наличии кислорода или диоксида углерода и оказывает интенсивное разрушающее действие на конструкционные материалы (трубопроводы, оборудование и т. д.) [1, 17]. Сероводород обладает уникальными агрессивными свойствами и вызывает коррозионное повреждение оборудования в результате электрохимической, а возможно, и химической, коррозии и водородного охрупчивания [1, 17]. Сероводородная коррозия — одна из наиболее серьезных причин внутренней коррозии при эксплуатации оборудования в широком диапазоне сред и условий [17, 18]. Под воздействием коррозионно-активных жидких сред с компонентами сульфидов существует опасность преждевременного разрушения сосудов и аппаратов давления, резервуаров, трубопроводов [19]. Для случаев, когда при технологических процессах среда содержит значительное количество сероводорода, также используют термин «сероводородное растрескивание» [1]. Компоненты углеводородной фазы (бензин, пропан, этан и т. д.), повышая растворимость сероводорода H_2S , вызывают растрескивание в водной фазе на металлической стенке внутренней поверхности элементов конструкции или трубопроводов [17, 19].

Таким образом, разработка комплекса мероприятий по защите металлических изделий и конструкций является одной из актуальных научно-технических задач.

Известно, что эффективным и экономически целесообразным способом защиты металлов от коррозии является применение ингибиторов коррозии [20–22]. Ингибиторы коррозии представляют собой либо органические, либо неорганические химические вещества, которые добавляются в небольших количествах (0,01...1,0 г/л) в коррозионную среду, для того чтобы задержать или уменьшить процесс коррозии защищаемой поверхности [20, 23]. Ингибиторы обладают свойством создавать на поверхности металла очень тонкую пленку вследствие адсорбции ингибитора или вследствие образования с ионами металла труднорастворимых соединений, что обеспечивает защиту металла [22–25].

Эффективность ингибиторного способа защиты оценивается по двум показателям: 1) скорость коррозии (в присутствии ингибитора); 2) степень защиты металла [17, 20, 25]. Ингибитор взаимодействует исключительно с поверхностью металла, его количество по сравнению с общим составом агрессивной среды относительно невелико. Механизм действия ингибиторов сложен и индивидуален, в зависимости от условий применения, его невозможно

объяснить с помощью универсальной теории. В настоящее время действие ингибиторов объясняется преимущественно адсорбционной и пленочной теориями [5, 17]. Ингибитор физически или химически адсорбируется на поверхности металла с образованием ингибиторной пленки, от сил сцепления которой с поверхностью металла будет зависеть эффективность защиты от внутренней коррозии. На защитные свойства ингибиторов влияют конкретные условия эксплуатации, состав водной фазы, динамический фактор (наличие или отсутствие перемешивания), тип коррозии (углекислотный или сероводородный) и др. Поэтому определенное химическое соединение может быть ингибитором коррозии одного металла и, одновременно, в той же среде стимулировать коррозию другого металла [5, 17, 25].

В настоящее время изучено огромное количество органических и неорганических веществ, которые оказывают влияние на скорость коррождения металлов [20, 21, 23]. Находят применение преимущественно органические ингибиторы, поскольку они способны образовывать защитные пленки на поверхности металлов [26–29].

Эффективность ингибирующего действия большинства органических соединений определяется их адсорбционной способностью при контакте с поверхностью металла. Как правило, эта способность достаточно велика вследствие наличия в молекулах атомов или функциональных групп, обеспечивающих активное адсорбционное взаимодействие ингибитора с металлом. Такими активными группами могут быть азот-, серо-, кислород- и фосфорсодержащие группы, которые адсорбируются на металле благодаря донорно-акцепторным и водородным связям [20, 23].

Наиболее широко распространены ингибиторы на основе азотсодержащих соединений. Защитный эффект проявляют алифатические амины и их соли, аминоспирты, аминокислоты, азометины, анилины, гидразиды, имиды, акрилонитрилы, имины, азотсодержащие пятичленные (бензимидазолы, имидазолины, бензотриазолы и т. д.) и шестичленные (пиридины, хинолины, пиперидины и т. д.) гетероциклы. Нашли применение пираны, пирины, диоксаны, фенолы, циклические и линейные эфиры, эфиры аллиловых спиртов, бензальдегиды и бензойные кислоты, димочевины, спирты, фураны, диоксоланы, ацетали, диоксоцикланы, тиокрезол, меркаптаны (тиолы) и др. [20, 23].

К настоящему времени известны десятки индивидуальных веществ и смесей на их основе в качестве эффективных замедлителей кор-

розии, которые выявлены эмпирическим путем на основе прямых коррозионных испытаний. Таким образом, ассортимент химических веществ, снижающих скорость коррозии, довольно широк. Однако универсальные ингибиторы коррозии не найдены. В каждом конкретном случае наибольший эффект оказывает весьма ограниченное количество веществ [20, 30]. С этой точки зрения поиск новых эффективных ингибиторов составляет актуальную задачу, не теряющую свою значимость в настоящее время.

Кроме того, большинство ингибиторов токсичны и не совсем соответствуют требованиям, предъявляемым к стандартам охраны окружающей среды. Именно по этой причине в последние годы усилия исследователей направлены на разработку новых экологически чистых ингибиторов. Было установлено, что для снижения скорости коррозии можно использовать натуральные продукты, растения и их экстракты [30, 31]. Данное направление исследований называют зеленой химией, а вещества соответственно зелеными ингибиторами [30]. Природные вещества достаточно легкодоступны, производятся из возобновляемых источников и, что немаловажно, обладают низкой экологической нагрузкой.

Особо следует отметить, что источниками экологически чистых ингибиторов могут быть нетоксичные и возобновляемые растительные отходы [32–36].

На подавляющем большинстве деревообрабатывающих предприятий древесные отходы (опилки, стружку, кору и др.) вывозят в отвалы, которые загрязняют окружающую среду. Вместо того чтобы получать прибыль от использования древесных отходов, например коры как вторичного древесного ресурса, предприятие вынуждено тратить денежные средства на утилизацию и содержание площадей для хранения отходов, уборку мест отвалов [12, 13].

Известно, что древесное сырье имеет в своем составе множество полезных компонентов [12, 37]. Даже из древесных отходов (древесная зелень, опилки, стружки, кора) с помощью экстракции можно извлечь ценные вещества [12]. Таким образом, данное доступное невостребованное сырье становится ценным благодаря получаемым из него продуктам.

Особо значимым ресурсом, из которого можно получить целевые продукты, является древесная кора. Ассортимент экстрактивных веществ коры древесины чрезвычайно разнообразен: он представлен спиртами, фенолами, альдегидами, кетонами, карбоновыми кислотами, амидами, лактонами, лигнанами, хинонами, производными альфа- и гамма-пирона, восками

и жирами, терпенами и смоляными кислотами, глюкозидами, флаванолами, алкалоидами, дубильными веществами, белками и другими веществами, потенциально влияющими на коррозионные изменения металлов [13, 37].

Одним из важнейших компонентов экстрактивных веществ коры древесины являются танины (дубильные вещества) — группа водорастворимых веществ ароматического характера [37]. Танины (таниды, танины или танниды) — ароматические, полифенольные соединения с большим количеством гидроксильных групп и молекулярной массой от 500 до 20 000 а. е. м., которые обладают характерными вяжущими свойствами, что придает им отличные ингибиторные свойства. По общепринятой классификации их подразделяют на гидролизуемые и конденсированные [12, 37]. Гидролизуемые танины являются сложными эфирами моносахаридов, главным образом глюкозы, и фенилкарбоновых кислот (галловой, дигалловой, эллаговой и др.). Их, в свою очередь, подразделяют на галлотанины, которые при гидролизе дают галловую кислоту, и эллаготанины, дающие при гидролизе кроме галловой эллаговую кислоту или биогенетически родственные ей кислоты [12]. Конденсированные танины не способны к гидролизу с образованием более простых соединений. К ним относят разнообразные по строению полигидроксифенольные соединения — производные флаванолов-3, флавандиолов-3,4 и гидроксистильбенов [12].

Из литературных данных известно, что эффективность ингибирующих свойств растительных экстрактов тем выше, чем выше в них содержание танинов [34, 36]. Характерной особенностью полифенолов является сорбционная активность, обусловленная их способностью адсорбироваться на влажной поверхности металла посредством водородных связей, а также комплексообразующая способность [34]. Фенольные группировки танинов проявляют антиоксидантную активность, образуя с катионами железа (III) прочные комплексные соединения [34, 38, 39].

Экстракты танинов образуют таннатные пленки на железных и стальных поверхностях и предохраняют металл от коррозии [33, 40]. В технологии окрашивания раствор танинов наносят на чистую металлическую поверхность вместо предварительной обработки фосфатом. Для этих целей наиболее пригодны гидролизуемые танины, которые придают металлам большую устойчивость против атмосферных воздействий, чем конденсированные танины [40, 41].

Способность танинов образовывать прочные соединения с солями трехвалентного железа позволяет также использовать их в качестве «преобразователей ржавчины» перед покраской окисленных железных поверхностей [37].

Предполагается, что фенольные группировки танинов ингибируют коррозию металла за счет образования с катионом железа (III) прочного комплексного соединения подобно оксидной пленке [33, 34].

Цель работы

Цель работы — исследования по выбору ингибиторов коррозии на основе экстрактов коры древесины, как важное техническое решение не только в области защиты металлов от коррозии, но и проблемы утилизации многотоннажных отходов деревообрабатывающих предприятий.

Экспериментальная часть

Выбор оптимальных условий получения экстрактов. В качестве ингибиторов коррозии исследовались водные экстракты коры ели (*Picea abies*) и коры сосны (*Pinaceae*).

Использование в качестве экстрагента воды обусловлено высоким содержанием в коре веществ, экстрагируемых водой [37]. Также нами было установлено, что добавление этанола к экстрактам снижало их устойчивость при хранении, что нежелательно при использовании, например, в качестве ингибиторов коррозии.

Эффективность экстрагирования зависит от некоторых факторов [12]: вида сырья, степени его измельчения, температуры, продолжительности экстракции, соотношения количества экстрагента и массы сырья.

Температура является важнейшим фактором [12]: чем выше температура экстрагирования, тем больше скорость диффузии и тем больше извлекается танинов из коры, но и тем больше танины разлагаются (при температуре 180...200 °C они разлагаются почти полностью). Увеличение продолжительности экстрагирования повышает выход танинов. Однако чем больше его продолжительность, тем сильнее они разлагаются.

Для подтверждения технологических режимов и условий экстракции на основании научно-технической литературы и ранее проведенных нами исследований, были поставлены модельные опыты с навесками сухих образцов коры. Перед приготовлением экстрактов кору высушивали и измельчали до размеров частиц 3...10 мм, но не до состояния муки, так как в такой средней фракции содержится максималь-

ное количество дубильных веществ. Установлено, что из данной фракции очень хорошо выделяются танины при экстрагировании в квасисистемах, по сравнению с более крупной фракцией. Более мелкая фракция содержит много частиц песка, которые мешают отделению экстракта от коры [33]. Следует иметь в виду, что слой мелких частиц может стать довольно плотным, что ухудшает контакт частиц с окружающей жидкостью.

Экстракт готовили следующим образом. В колбу емкостью 500 мл помещали 20 г высушенной и измельченной коры и добавляли 200 мл дистиллированной воды. Колбу устанавливали в водяную баню и нагревали с обратным холодильником при 90...95 °C на электрической плитке в течение 1 ч, не доводя до кипения. Экстрагирование в данных условиях наиболее оптимально, поскольку при более высокой температуре структура танинов может необратимо разрушаться. А при длительном экстрагировании выделенные танины начинают обратно адсорбироваться на поверхности коры с частичным разложением [33, 42]. После отстаивания и охлаждения содержимого колбы водный экстракт отфильтровывали через плотный фильтр. Водный экстракт коры ели представлял собой прозрачную жидкость темно-коричневого цвета со специфическим приятным запахом. Экстракт коры сосны отличался более светлым оттенком, нежели экстракт ели, и также имел характерный приятный запах.

Определение концентрации экстрактов проводили по методу сухого остатка следующим образом [43, 44]. Экстракт в количестве 10 мл с помощью пипетки помещали в предварительно взвешенную фарфоровую чашку, упаривали и сушили при температуре 40...60 °C в сушильном шкафу, охлаждали в эксикаторе и взвешивали чашку с остатком на аналитических весах. Средняя концентрация экстракта сосны составляла 3,4 мг/мл, экстракта ели — 6 мг/мл.

При дальнейших испытаниях полученные экстракты добавляли в коррозионную среду в количестве 0,2...2 г/л (50...300 мл/л).

Изучение водных экстрактов коры древесины в качестве ингибиторов коррозии. Эффективность полученных экстрактов как ингибиторов коррозии оценивали по отношению к стали марки Ст3. В качестве коррозионной среды использовали 5%-й раствор соляной кислоты (HCl). Коррозионные испытания образцов стали проводили в условиях, моделирующих промышленную соляно-кислотную промывку и очистку варочного и теплообменного оборудования от накипи и отложений в ЦБП [7, 10].

Для оценки показателей коррозии был выбран гравиметрический метода анализа, основанный на определении изменения массы стальных образцов за время их пребывания в неингибированной и ингибированной испытательных агрессивных средах.

Испытания для определения массового показателя коррозии проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 9. 908–85, время испытаний составляло от 8 до 168 ч [45]. Образцами для испытаний служили плоские образцы (пластины) размером 50×20×2 мм.

Металлические образцы перед опытом обезжиривали ацетоном, высушивали фильтровальной бумагой, выдерживали в эксикаторе, содержащем поглотитель влаги (прокаленный хлорид кальция CaCl_2) в течение 1 ч, затем взвешивали на аналитических весах.

По истечении времени выдержки в испытательной среде образцы извлекали, промывали в проточной воде, проводили внешний осмотр, отмечая вид продуктов коррозии и коррозионных повреждений.

Поверхность образцов освобождали от продуктов коррозии, промывали дистиллированной водой, протирали фильтровальной бумагой, выдерживали в течение 1 ч над поглотителем влаги в эксикаторе и повторно взвешивали. В каждом режиме проводили не менее двух параллельных испытаний в образцах и не менее трех для каждого испытания. Время испытания образцов в ингибированной и неингибированной испытательных средах было одинаковым.

По убыли массы находили количественные показатели коррозии: среднюю скорость коррозии, степень защиты или защитное действие от коррозии, ингибиторный эффект [7].

Скорость коррозии рассчитывали по формуле

$$K = \frac{\Delta m}{S \tau},$$

где K — скорость коррозии, г/(м²·ч);

Δm — уменьшение массы стального образца, г;

S — площадь поверхности образца, м²;

τ — время испытания, ч.

Защитную эффективность (в процентах) рассчитывали по формуле

$$Z = \frac{K_o - K_{\text{и}}}{K_o} 100 \%,$$

где Z — защитная эффективность, %;

K_o — скорость коррозии образцов в отсутствии ингибитора, г/(м²·ч);

$K_{\text{и}}$ — скорость коррозии образцов в присутствии ингибитора, г/(м²·ч).

Ингибиторный эффект γ показывает, во сколько раз ингибитор уменьшает скорость коррозии, и вычисляется по формуле

$$\gamma = \frac{K_o}{K_{\text{и}}}.$$

Серией опытов было показано, что оптимальная концентрация в коррозионной среде для экстракта коры сосны составляет 0,7...1,0 г/л, для экстракта коры ели — 0,8...1,5 г/л. Дальнейшее повышение концентрации ингибитора в коррозионной среде не приводило к увеличению степени защиты и не было целесообразным.

Результаты и обсуждение

Проведены гравиметрические исследования защитной эффективности экстрактов коры сосны и коры ели (табл. 1, 2).

Установлено, что выбранные растительные экстракты проявили хорошее ингибирующее действие. Степень защиты составила 86,4...87,4 % при использовании в качестве ингибитора кислотной коррозии экстракта коры сосны; 85,3...89,4 % — в случае использования экстракта коры ели. Скорость коррозии при оптимальной концентрации экстрактов снижалась в 8–9,5 раз. Полученные данные свидетельствуют о высокой защитной эффективности предложенных зеленых ингибиторов. Как известно, если $Z = 57...89$ % ($\gamma = 2,3...9,1$), ингибитор считается хорошим, при $Z \geq 90$ % ($\gamma \geq 10$) — превосходным [7].

Следует отметить, что образцы, выдержанные в растворе соляной кислоты без ингибитора, были покрыты рыхлыми, серо-бурыми продуктами коррозии, тогда как в растворах с добавкой растительных экстрактов — поверхность образцов не имела следов разрушений в течение всего периода исследования.

Проведено сравнение противокоррозионной активности изученных экстрактов коры (табл. 3), где для сравнения приведены данные по защитному действию широко известного ингибитора уротропина [7].

Механизм действия разработанных ингибиторов в значительной степени обусловлен хемосорбцией химически активных компонентов на поверхности металла и образованием пленки, которая изолирует эту поверхность от агрессивного воздействия среды. Компонентами растительных экстрактов, способными существенно влиять на коррозионный процесс, являются дубильные вещества (таннины), а также угле-

Т а б л и ц а 1

Гравиметрические исследования противокоррозионной активности экстракта коры сосны на образце стали марки Ст3 в 5%-й соляной кислоте HCl ($T = 298\text{ K}$, $\tau = 22\text{ ч}$)**Gravimetric studies of the anticorrosion activity of pine bark extract on St3 in 5 % HCl ($T = 298\text{ K}$, $\tau = 22\text{ h}$) of the anticorrosion activity of pine bark extract on St3 steel sample in 5% hydrochloric acid HCl ($T = 298\text{ K}$, $\tau = 22\text{ h}$)**

Концентрация ингибитора C , г/л	Уменьшение массы образца Δm , г	Скорость коррозии K , г/(м ² ·ч)	Ингибиторный эффект γ	Защитная эффективность Z , %
Без ингибитора	0,0207	5,379122	—	—
0,17	0,0055	1,434388	3,75	73,33
0,34	0,0051	1,320548	4,07	75,45
0,51	0,0040	1,051913	5,11	80,44
0,68	0,0028	0,732876	7,34	86,38
0,85	0,0027	0,691686	7,78	87,14
1,02	0,0026	0,678074	7,93	87,39
1,19	0,0450	0,939875	5,72	82,53

Т а б л и ц а 2

Гравиметрические исследования противокоррозионной активности экстракта коры ели на образце стали марки Ст3 в 5%-й соляной кислоте HCl ($T = 298\text{ K}$, $\tau = 22\text{ ч}$)**Gravimetric studies of the anticorrosion activity of spruce bark extract on St3 in 5 % HCl ($T = 298\text{ K}$, $\tau = 22\text{ h}$)**

Концентрация ингибитора C , г/л	Уменьшение массы образца Δm , г	Скорость коррозии K , г/(м ² ·ч)	Ингибиторный эффект γ	Защитная эффективность Z , %
Без ингибитора	0,0198	5,108548	—	—
0,3	0,0038	1,010335	5,06	80,22
0,6	0,0039	1,017111	5,026	80,09
0,8	0,0029	0,753597	6,78	85,25
1,0	0,0026	0,683743	7,47	86,62
1,2	0,0021	0,543755	9,39	89,36
1,5	0,0022	0,576456	8,86	88,72

воды, фенолы, аминокислоты, альдегиды [34]. Дубильные вещества — полифенолы (на долю фенольных гидроксильных групп приходится 15...30 % молекулярной массы) [36].

Характерная особенность полифенолов — сорбционная активность, обусловленная их способностью адсорбироваться на влажной поверхности металла посредством водородных связей, а также комплексообразующая активность, связанная с наличием в структуре гидроксильных и карбонильных групп, способных образовывать с катионами металла ионную или донорно-акцепторную связь [34]. Поскольку реакционноспособные группы находятся в орто-положении одна к другой, образующиеся при этом комплексы имеют хелатное строение и довольно устойчивы. Защита металла зависит от ориентации молекулы таннина относительно поверхности стали. При плоском размещении

могут образовываться устойчивые химические связи между гидроксильными группами таннина и атомами железа, тогда как при увеличении концентрации молекулы таннина размещаются перпендикулярно по отношению к поверхности образца и образуют темнофиолетовые легкоподвижные комплексные соединения с ионами железа. В этом случае при увеличении концентрации экстрактов растительных добавок степень защиты уменьшается, коррозионная среда приобретает фиолетовую окраску [34].

Предложенные в настоящей работе экстракты на основе растительного сырья являются экологически безопасными нетоксичными ингибиторами коррозии.

Следует отметить, что с экономической и экологической точек зрения экстракты растений — это отличная альтернатива синтетическим ингибиторам вследствие доступности и

Т а б л и ц а 3

**Противокоррозионная активность экстрактов коры сосны и коры ели
на образце стали марки Ст3 ($T = 298\text{ K}$, $\tau = 22\text{ ч}$)**

Anticorrosive activity of pine bark and spruce bark extracts on St3 ($T = 298\text{ K}$, $\tau = 22\text{ h}$)

Ингибитор	Концентрация ингибитора C , г/л	Скорость коррозии K , г/(м ² ·ч)	Ингибиторный эффект γ	Защитная эффективность Z , %
Без ингибитора	—	5,24	—	—
Уротропин	3,0	2,14	2,4	59,93
Экстракт коры сосны	1,0	0,68	7,7	87,39
Экстракт коры ели	1,2	0,54	9,7	89,36

биоразлагаемости. Растительные экстракты можно получить простыми способами с использованием доступных и дешевых растворителей, для них не требуется дополнительная очистка.

Отличительной особенностью процесса переработки коры является простота процесса ее подготовки, не требующая сложного и дорогостоящего оборудования, а также возможность использования как свежей, так и уже скопившейся в отвалах коры практически в неограниченных количествах.

Использование воды в качестве растворителя при экстрагировании сводит к нулю негативное воздействие на окружающую среду в отличие от других популярных ингибиторов коррозии, используемых в наши дни. Твердый остаток коры после экстракции является пористым углеродным материалом с высокой сорбирующей способностью — это его свойство используется для внесения азот- и фосфорсодержащих добавок, необходимых для производства качественных удобрений, а сам экстракт коры найдет свое применение в качестве замедлителя процесса разрушения металлических конструкций этого же предприятия.

Выводы

Использование промышленных древесных отходов для получения других продуктов обеспечит повышение степени использования исходного сырья и снижение материальных затрат на единицу выпускаемой продукции и, следовательно, ее себестоимость. При этом будет решена не только проблема более экономного использования сырья, вспомогательных материалов и энергоресурсов, но и проблема охраны окружающей среды. Кроме того, утилизация коры имеет большое экологическое и экономическое значение для предприятий химической переработки древесины. Окорка проводится на предприятиях ЦБП в ходе подготовки сырья. Ежегодные ресурсы коры

достигают 15...18 млн м³, значительная часть этого объема коры не находит сбыта и вывозится на свалки [12]. Предложенные ингибиторы коррозии (водные экстракты коры древесины) готовятся из дешевого и доступного сырья, производимого на территории РФ.

Список литературы

- [1] Кац Н.Г., Стариков В.П., Парфенова С.Н. Химическое сопротивление материалов и защита оборудования нефтегазопереработки. М.: Машиностроение, 2011. 436 с.
- [2] Пахомов В.С. Коррозия и защита теплообменного оборудования химических производств. Пенза: Изд-во ПЕНЗГТУ, 2013, 364 с.
- [3] Олиференко Г.Л., Иванкин А.Н., Устюгов А.В., Зарубина А.Н. Проблема коррозии технологического оборудования на предприятиях по химической переработке древесины (обзор) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 3. С. 142–151. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-142-151
- [4] Вагапов Р.К., Запечалов Д.Н., Ибатуллин К.А. Исследование коррозии объектов инфраструктуры газодобычи в присутствии CO₂ аналитическими методами контроля // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2020. Т. 86. №10. С. 23–30.
- [5] Кантюков Р.Р., Запечалов Д.Н., Вагапов Р.К. Исследование коррозионной активности сред и стойкости используемых материалов в условиях присутствия агрессивного диоксида углерода // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2021. Т. 64. № 11. С. 793–801.
- [6] Замалетдинов И.И. Коррозия и защита металлов. Коррозия порошковых материалов. Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2007. 188 с.
- [7] Коррозия и защита металлов и оборудования: методические указания / сост. Е.В. Школьников, И.Я. Киселев. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2014. 40 с.
- [8] Ермашева В.М. Коррозия нержавеющей стали в варочных средах целлюлозно-бумажной промышленности и технологические способы защиты от нее: дис. ... канд. хим. наук. Пермский университет. Пермь, 1996. 126 с.
- [9] Ананьева Г.Ф., Школьников Е.В., Ингибирующие добавки и коррозия котельной стали 20К // Бумажная промышленность, 1986. № 12. С. 26–27.

- [10] Школьников Е.В., Ананьева Г.Ф., Смирнов В.Д. Как снизить коррозию варочных котлов // Бумажная промышленность, 1988. № 12. С. 32–34.
- [11] Русских А.С. Разработка энергосберегающей технологии деполимеризации полисахаридов древесины: автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 1999. 21 с.
- [12] Ковернинский И.Н., Комаров В.И., Третьяков С.И., Богданович Н.И., Соколов О.М., Кутакова Н.А., Селянина Л.И. Комплексная химическая переработка древесины / под ред. И.Н. Ковернинского. Архангельск: Изд-во Архангельского ГТУ, 2022. 347 с.
- [13] Комплексная химическая переработка древесины / сост. А.В. Буров, Р.Г. Алиев, Э.П. Терентьева и др. СПб.: Изд-во СПб ГТУРП, 2008. 61 с.
- [14] Вагапов Р.К., Михалкина О.Г. Исследование продуктов углекислотной коррозии методом рентгеновской дифракции // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2022. Т. 88. № 9. С. 35–41.
- [15] Вагапов Р.К., Запечалов Д.Н., Ибатуллин К.А. Анализ воздействия основных факторов эксплуатации на коррозионную ситуацию на объектах добычи газа в присутствии диоксида углерода // Наука и техника в газовой промышленности, 2020. № 3 (83). С. 38–46.
- [16] Кантюков Р.Р., Запечалов Д.Н., Вагапов Р.К. Оценка опасности внутренней углекислотной коррозии по отношению к промысловым оборудованию и трубопроводам на газовых и газоконденсатных месторождениях // Безопасность труда в промышленности, 2021. № 2. С. 56–62.
- [17] Синютина С.Е., Вигдорович В.И. Современное состояние и проблема сероводородной коррозии металлов в растворах электролитов // Вестник ГТУ, 2002. Т. 7. Вып. 3. С. 319–328.
- [18] Томский И.С., Вагапов Р.К., Запечалов Д.Н. Оценка агрессивности добываемых сред при ингибировании от коррозии промысловых трубопроводов // Успехи в химии и химической технологии, 2021. Т. 35. № 5. С. 104–106.
- [19] Вагапов Р.К. Исследование наводороживания и коррозии стального оборудования и трубопроводов на объектах добычи H_2S -содержащего углеводородного сырья // Вопросы материаловедения, 2021. № 2 (106). С. 170–181. DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-170-181
- [20] Козлова Л.С., Сибилева С.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Ингибиторы коррозии (обзор) // Авиационные материалы и технологии, 2015. № 2. С. 67–75.
- [21] Sheetal A., Singh A.K., Thakur S., Pani B., Singh M. Heterocyclic compounds as corrosion inhibitors for iron alloys in various industrial processes. A review // J. of Industrial and Engineering Chemistry, 2024, v. 130, no. 2, pp. 141–177. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.10.005>
- [22] Zamaletdinov I.I., Baryshnikov I.N. On the characteristic potentials of pitting corrosion of compact and powder steel // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2017, v. 53, no. 7, pp. 1227–1234. DOI: 10.1134/S207020511707019X
- [23] Хайдарова Р.Г. Ингибиторы коррозии для защиты нефтепромыслового оборудования // Современные проблемы науки и образования, 2014. № 6. С. 1–8.
- [24] Фархутдинова А.Р., Мукалдисов Н.И., Елпидинский А.А., Гречехина А.А. Составы ингибиторов коррозии для различных сред // Вестник Казанского технологического университета, 2013. Т. 16. Вып. 4. С. 274–280.
- [25] Вигдорович В.И., Стрельникова К.О. Защитная эффективность системы «поверхностная пленка — ингибитор АМДОР ИК-7» в комбинированных сероводородно-углекислотных средах // Практика противокоррозионной защиты, 2012. № 2 (64). С. 4–12.
- [26] Chikhalikar A.S., Godbole E.P., Poerschke D.L. Approach for statistical analysis of oxide- and sulfate-induced hot corrosion of advanced alloys // Corrosion Science, 2023, v. 211, no. 2, p. 110892. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110892>
- [27] Jafari H., Ameri E., Rezaeivala M., Berisha A. Experimental and theoretical studies on protecting steel against 0.5 M H_2SO_4 corrosion by new schiff base // J. of the Indian Chemical Society, 2022, v. 99, no. 9, p. 100665. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100665>
- [28] Fischer A., Telouk P., Wimmer M.A. The gross slip fretting corrosion mechanisms of biomedical ceramic-metal couples // Biotribology, 2023, v. 35–36, no. 12, p. 100252. <https://doi.org/10.1016/j.biotri.2023.100252>
- [29] Delavar H., Mostahsan A.J., Ibrahim H. Corrosion and corrosion-fatigue behavior of magnesium metal matrix composites for bio-implant applications. A review // J. of Magnesium and Alloys, 2023, v. 11, no. 4, pp. 1125–1161. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.04.010>
- [30] Шипигузов И.А., Колесова О.В., Вахрушев В.В., Казанцев А.Л., Пойлов В.З., Лановецкий С.В., Черезова Л.А. Современные ингибиторы коррозии // Вестник ПНИПУ, 2016. № 1. С. 114–127.
- [31] Yadav M., Goel G., Hatton F.L., Bhagat M., Mehta S.K., Mishra R.K., Bhojak N. A review on biomass-derived materials and their applications as corrosion inhibitors, catalysts, food and drug delivery agents // Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 2021, v. 4, p. 100153. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100153>
- [32] Cheng H., Luo X., Wu X. Recent research progress on additive manufacturing of high-strength low-alloy steels: Focusing on the processing parameters, microstructures and properties // Materials Today Communications, 2023, v. 36, no. 8, p. 106616. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106616>
- [33] Кузьмина И.Е. Разработка рецептуры преобразователя ржавчины на основе экстракта коры лиственницы. Северо-Якутск: Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова; Институт естественных наук, 2019. 64 с.
- [34] Савченко О.Н., Сизая О.И., Челябинова В.Н., Максименко А.А. Экстракты растительного сырья в ингибиторной защите стали // Физикохимия поверхности и защита материалов, 2018. Т. 54. № 3. С. 319–324. DOI: 10.7868/S0044185618030154
- [35] Nav T.Z., Pumpel T., Bosch D., Bockreis A. Insight into the application of biochars produced from wood residues for removing different fractions of dissolved organic material (DOM) from bio-treated wastewater // Environmental Technology & Innovation, 2023, v. 32, no. 11, p. 103271. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103271>
- [36] Паршутин В.В., Шолтоян Н.С., Сидельникова С.П., Коваль А.В., Булхак И.И., Болога О.А., Шофранский В.Н. Влияние водного экстракта плодов

- конского каштана на коррозию стали Ст3 в воде // Электронная обработка материалов, 2011. Т. 47. № 3. С. 90–99.
- [37] Кононов Г.Н. Дендрохимия. М.: МГУЛ, 2015. Т. 1. 480 с.
- [38] Verma C., Quraishi M.A., Alfantazi A., Rhee K.Y. Biodegradable synthetic polymers in sustainable corrosion protection. Present and future scenarios // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2023, v. 6, no. 10, pp. 407–435. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.04.005>
- [39] Yoshimoto H., Fathona I.W., Yabuki A. Self-healing polymer coating with efficient delivery for alginates and calcium nitrite to provide corrosion protection for carbon steel // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, v. 662, no. 4, p. 130970. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.130970>
- [40] Экстрактивные вещества древесины и значение их в целлюлозно-бумажном производстве / под. ред. В.Е. Хиллиса. М.: Лесная пром-сть, 1965. 487 с.
- [41] Singhal T.S., Jain J.K. GMAW cladding on metals to impart anti-corrosiveness: Machine, processes and materials // Materials Today: Proceedings, 2020, v. 26, no. 2, pp. 2432–2441. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.518>
- [42] Тарасов С.М., Кононов Г.Н. Комплексная химическая переработка древесины. Технология лесохимических и гидролизных производств. М.: МГУЛ, 2016. 122 с.
- [43] Зарубина А.Н., Иванкин А.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В. Комплексная химическая переработка древесины. М.: МГУЛ, 2016. 37 с.
- [44] Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
- [45] ГОСТ 9. 908–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. Межгосударственный стандарт. М.: Изд-во стандартов, 1985. 79 с.

Сведения об авторах

Олиференко Галина Львовна✉ — канд. хим. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), oliferenko2@inbox.ru

Грибанова Анастасия Константиновна — студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), boob1234@icloud.com

Иванкин Андрей Николаевич — д-р хим. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), aivankin@bmstu.ru

Вагапов Руслан Кизитович — д-р техн. наук, начальник лаборатории защиты от атмосферной и внутренней коррозии КНТИЦ коррозионного мониторинга и защиты от коррозии, ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий — Газпром ВНИИГАЗ», kizit@rambler.ru

Устюгов Александр Викторович — канд. хим. наук, доцент, ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА), ustugov.alexandr@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2024.

Одобрено после рецензирования 22.11.2024.

Принята к публикации 24.02.2025.

CORROSION INHIBITORS BASED ON COMPOUNDS OF PLANT ORIGIN

G.L. Oliferenko¹✉, A.K. Gribanova¹, A.N. Ivankin¹,
R.K. Vagapov², A.V. Ustyugov³

¹BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²Scientific and Technical Center for Corrosion Monitoring and Corrosion Protection «Gazprom VNIIGAZ», 15, build. 1, Gazovikov st., 142717, Leninsky city district, settlement Razvilka, Moscow reg., Russia

³Russian Technological University RTU MIREA, 78, Vernadsky av., 119454, Moscow, Russia

oliferenko2@inbox.ru

The article studies the materials on corrosion inhibitors based on wood bark extracts. Optimal conditions for obtaining extracts from pine bark and spruce bark are determined. Aqueous extracts of pine bark and spruce bark have been studied as inhibitors of acid corrosion of St3 steel. Corrosion tests of steel samples were carried out under conditions modelling industrial salt-acid washing and cleaning of cooking and heat-exchange equipment from scale and deposits in the pulp and paper industry. High protective efficiency of the proposed «green inhibitors» has been established

Keywords: metal corrosion, corrosion inhibitors, environmentally friendly «green inhibitors», wood bark extracts

Suggested citation: Oliferenko G.L., Gribanova A.K., Ivankin A.N., Vagapov R.K., Ustyugov A.V. *Ingibitory korrozii na osnove soedineniy rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [Corrosion inhibitors based on compounds of plant origin]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 3, pp. 156–168.

DOI: 10.18698/2542-1468-2025-3-156-168

References

- [1] Katz N.G., Starikov V.P., Parfenova S.N. *Khimicheskoe soprotivlenie materialov i zashchita oborudovaniya neftegazopererabotki* [Chemical resistance of materials and protection of oil and gas processing equipment]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 436 p.
- [2] Pakhomov V.S. *Korroziya i zashchita teploobmennogo oborudovaniya khimicheskikh proizvodstv* [Corrosion and protection of heat exchange equipment of chemical industries: Monograph]. Penza: Izd-vo Penz. gos. tekhnol. un-ta [Penza State Technical University Publ.], 2013, 364 p.
- [3] Oliferenko G.L., Ivankin A.N., Ustyugov A.V., Zarubina A.N. *Problema korrozii tekhnologicheskogo oborudovaniya na predpriyatiyakh po khimicheskoy pererabotke drevesiny (obzor)* [Issue of technological equipment corrosion at chemical wood processing enterprises (review)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 142–151. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-142-151
- [4] Vagapov R.K., Zapevalov D.N., Ibatullin K.A. *Issledovanie korrozii ob'ektov infrastruktury gazodobychi v prisutstvii CO₂, analiticheskimi metodami kontrolya* [Investigation of corrosion of gas production infrastructure facilities in the presence of CO₂ by analytical control methods]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Plant laboratory. Diagnostics of materials], 2020, v. 86, no. 10, pp. 23–30. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-10-23-30
- [5] Kantyukov R.R., Zapevalov D.N., Vagapov R.K. *Issledovanie korroziionnoy aktivnosti sred i stoykosti ispol'zuemykh materialov v usloviyakh prisutstviya agressivnogo dioksida ugleroda* [Investigation of the corrosive activity of media and the resistance of materials used in the presence of aggressive carbon dioxide]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy], 2021, v. 64, no. 11, pp. 793–801.
- [6] Zamaletdinov I.I. *Korroziya i zashchita metallov. Korroziya poroshkovykh materialov* [Corrosion and protection of metals. Corrosion of powder materials]. Perm: Izd-vo Perm. gos. tekhnol. un-ta [Perm State Technical University Publ.], 2007, 188 p.
- [7] Shkolnikov E.V., Kiselyov I.Ya. *Korroziya i zashchita metallov i oborudovaniya* [Corrosion and protection of metals and equipment]. St. Petersburg: SPbGLTU, 2014, 40 p.
- [8] Ermasheva V.M. *Korroziya nerzhavayushchikh staley v varochnykh sredakh tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti i tekhnologicheskie sposoby zashchity ot nee* [Corrosion of stainless steels in cooking media of the pulp and paper industry and technological methods of protection against it]. Dis. Cand. Sci. (Chemical). Perm, Perm University, 1996, 126 p.
- [9] Ananyeva G.F., Shkolnikov E.V. *Ingibiruyushchie dobavki i korroziya kotel'noy stali 20K* [Inhibitory additives and corrosion of boiler steel 20K]. *Bumazhnaya promyshlennost'* [Paper industry], 1986, no. 12, pp. 26–27.
- [10] Shkolnikov E.V., Ananyeva G.F., Smirnov V.D. *Kak snizit' korroziyu varochnykh kotlov* [How to reduce the corrosion of digesters]. *Bumazhnaya promyshlennost'* [Paper industry], 1988, no. 12, pp. 32–34.
- [11] Russian A.S. *Razrabotka energosberegayushchey tekhnologii depolimerizatsii polisakharidov drevesiny* [Development of energy-saving technology for depolymerization of polysaccharides of wood]. Dis. Cand. Sci. (Chemical). Moscow, 1999, 21 p.

- [12] Koverninsky I.N., Komarov V.I., Tretyakov S.I., Bogdanovich N.I., Sokolov O.M., Kutakova N.A., Selyanina L.I. *Kompleksnaya khimicheskaya pererabotka drevesiny* [Complex chemical processing of wood]. Ed. I.N. Koverninsky. Arkhangel'sk: Izd-vo Arkhangel'skogo GTU [Arkhangelsk State Technical University Publ.], 2022, 347 p.
- [13] Burov A.V., Aliyev R.G., Terentyeva E.P. *Kompleksnaya khimicheskaya pererabotka drevesiny* [Complex chemical processing of wood]. St. Petersburg: SPb GTURP, 2008, 61 p.
- [14] Vagapov R.K., Mikhalkina O.G. *Issledovanie produktov uglekislotoy korrozii metodom rentgenovskoy difraktsii* [Investigation of carbon dioxide corrosion products by X-ray diffraction method]. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Plant laboratory. Diagnostics of materials], 2022, v. 88, no. 9, pp. 35–41. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-9-35-41
- [15] Vagapov R.K., Zapevalov D.N., Ibatullin K.A. *Analiz vozdeystviya osnovnykh faktorov ekspluatatsii na korroziionnyu situatsiyu na ob'ektakh dobychi gaza v prisutstvi dioksida ugleroda* [Analysis of the impact of the main operational factors on the corrosive situation at gas production facilities in the presence of carbon dioxide]. Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti [Science and Technology in the Gas Industry], 2020, no. 3 (83), pp. 38–46.
- [16] Kantukov R.R., Zapevalov D.N., Vagapov R.K. *Otsenka opasnosti vnutrenney uglekislotoy korrozii po otnosheniyu k promyslovym oborudovaniyu i truboprovodam na gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniyakh* [Assessment of the danger of internal carbon dioxide corrosion in relation to field equipment and pipelines at gas and gas condensate fields]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Occupational Safety in Industry], 2021, no. 2, pp. 56–62.
- [17] Sinyutina S.E., Vigdorovich V.I. *Sovremennoe sostoyanie i problema serovodorodnoy korrozii metallov v rastvorakh elektrolitov* [The current state and problem of hydrogen sulfide corrosion of metals in electrolyte solutions]. Vestnik TGU [Bulletin of TSU], 2002, v. 7, no. 3, pp. 319–328.
- [18] Tomsy I.S., Vagapov R.K., Zapevalov D.N. *Otsenka agressivnosti dobyvaemykh sred pri ingibirovani ot korrozii promyslovyykh truboprovodov* [Assessment of the aggressiveness of extracted media during corrosion inhibition of field pipelines]. Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii [Successes in Chemistry and Chemical Technology], 2021, v. 35, no. 5, pp. 104–106.
- [19] Vagapov R.K. *Issledovanie navodorozhivaniya i korrozii stal'nogo oborudovaniya i truboprovodov na ob'ektakh dobychi H₂S-soderzhashchego uglevodorodnogo syr'ya* [Investigation of flooding and corrosion of steel equipment and pipelines at production facilities of H₂S-containing hydrocarbon raw materials]. Voprosy materialovedeniya [Issues of Materials Science], 2021, no. 2 (106), pp. 170–181. DOI: 10.22349/1994-6716-2021-106-2-170-181
- [20] Kozlova L.S., Sibileva S.V., Chesnokov D.V., Kutryev A.E. *Ingibitory korrozii (obzor)* [Corrosion inhibitors (review)]. Aviatsonnyye materialy i tekhnologii [Aviation Materials and Technologies], 2015, no. 2, pp. 67–75.
- [21] Sheetal A., Singh A.K., Thakur S., Pani B., Singh M. Heterocyclic compounds as corrosion inhibitors for iron alloys in various industrial processes. A review // Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2024, v. 130, no. 2, pp. 141–177. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.10.005>
- [22] Zamaletdinov I.I., Baryshnikov I.N. On the characteristic potentials of pitting corrosion of compact and powder steel // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2017, v. 53, no. 7, pp. 1227–1234. DOI: 10.1134/S207020511707019X.
- [23] Khaidarova R.G. *Ingibitory korrozii dlya zashchity neftepromyslovogo oborudovaniya* [Corrosion inhibitors for protection of oilfield equipment]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education], 2014, no. 6, pp. 1–8.
- [24] Farkhutdinova A.R., Mukatdisov N.I., Elpidinsky A.A., Grechekhina A.A. *Sostavy ingibitorov korrozii dlya razlichnykh sred* [Compositions of corrosion inhibitors for various media]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University], 2013, v. 16, no. 4, pp. 274–280.
- [25] Vigdorovich V.I., Strelnikova K.O. *Zashchitnaya effektivnost' sistemy «poverkhnostnaya plenka — ingibitor AMDOR IK-7» v kombinirovannykh serovodorodno-uglekislotoykh sredakh* [Protective effectiveness of the system «surface film inhibitor AMDOR IK-7» in combined hydrogen sulfide-carbon dioxide media]. Praktika protivokorroziionnoy zashchity [Practice of Anticorrosive Protection], 2012, no. 2 (64), pp. 4–12.
- [26] Chikhalikar A.S., Godbole E.P., Poerschke D.L. Approach for statistical analysis of oxide- and sulfate-induced hot corrosion of advanced alloys. Corrosion Science, 2023, v. 211, no. 2, p. 110892. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110892>
- [27] Jafari H., Ameri E., Rezaeivala M., Berisha A. Experimental and theoretical studies on protecting steel against 0.5 M H₂SO₄ corrosion by new schiff base. J. of the Indian Chemical Society, 2022, v. 99, no. 9, p. 100665. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100665>
- [28] Fischer A., Telouk P., Wimmer M.A. The gross slip fretting corrosion mechanisms of biomedical ceramic-metal couples. Biotribology, 2023, v. 35–36, no. 12, p. 100252. <https://doi.org/10.1016/j.biotri.2023.100252>
- [29] Delavar H., Mostahsan A.J., Ibrahim H. Corrosion and corrosion-fatigue behavior of magnesium metal matrix composites for bio-implant applications. A review. J. of Magnesium and Alloys, 2023, v. 11, no. 4, pp. 1125–1161. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.04.010>
- [30] Shipiguzov I.A., Kolesova O.V., Vakhrushev V.V., Kazantsev A.L., Poilov V.Z., Lanovetsky S.V., Cherezova L.A. *Sovremennye ingibitory korrozii* [Modern corrosion inhibitors]. Vestnik PNIPU [Bulletin of PNRPU], 2016, no. 1, pp. 114–127.
- [31] Yadav M., Goel G., Hatton F.L., Bhagat M., Mehta S.K., Mishra R.K., Bhojak N. A review on biomass-derived materials and their applications as corrosion inhibitors, catalysts, food and drug delivery agents. Current Research in Green and Sustainable Chemistry, 2021, v. 4, p. 100153. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100153>
- [32] Cheng H., Luo X., Wu X. Recent research progress on additive manufacturing of high-strength low-alloy steels: Focusing on the processing parameters, microstructures and properties. Materials Today Communications, 2023, v. 36, no. 8, p. 106616. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106616>

- [33] Kuzmina I.E. *Razrabotka retseptury preobrazovatelya rzhavchiny na osnove ekstrakta kory listvennitsy* [Development of a rust converter formulation based on larch bark extract]. Severo-Yakutsk, Vostochnyy federal'nyy universitet im. M.K. Ammosova. Institut estestvennykh nauk [M.K. Ammosov Northeastern Federal University. Institute of Natural Sciences], 2019, 64 p.
- [34] Savchenko O.N., Sizaya O.I., Chelyabieva V.N., Maksimenko A.A. *Ekstrakty rastitel'nogo syr'ya v inhibitornoy zashchite stali* [Extracts of plant raw materials in the inhibitory protection of steel]. Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov [Physicochemistry of the surface and protection of materials], 2018, v. 54, no. 3, pp. 319–324. DOI: 10.7868/S0044185618030154
- [35] Nav T.Z., Pempel T., Bosch D., Bockreis A. Insight into the application of biochars produced from wood residues for removing different fractions of dissolved organic material (DOM) from bio-treated wastewater. *Environmental Technology & Innovation*, 2023, v. 32, no. 11, p. 103271. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103271>
- [36] Parshutin V.V., Sholtovoy N.S., Sidelnikova S.P., Koval A.V., Bulhak I.I., Bologa O.A., Shofransky V.N. *Vliyanie vodnogo ekstrakta plodov konskogo kashtana na korroziyu stali St3 v vode* [Influence of aqueous extract of horse chestnut fruits on corrosion of steel ST3 in water]. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic Processing of Materials], 2011, v. 47, no. 3, pp. 90–99.
- [37] Kononov G.N. *Dendrokimiya* [Dendrochemistry] Moscow: Moscow State Forestry University Publ., 2015, v. 1, 480 p.
- [38] Verma C., Quraisi M.A., Alfantazi A., Rhee K.Y. Biodegradable synthetic polymers in sustainable corrosion protection. Present and future scenarios. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2023, v. 6, no. 10, pp. 407–435. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.04.005>
- [39] Yoshimoto H., Fathona I.W., Yabuki A. Self-healing polymer coating with efficient delivery for alginates and calcium nitrite to provide corrosion protection for carbon steel // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, v. 662, no. 4, p. 130970. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.130970>
- [40] Hillis V.E. *Ekstraktivnye veshchestva drevesiny i znachenie ikh v tsellyulozno-bumazhnom proizvodstve* [Extractive substances of wood and their importance in pulp and paper production]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry Publ.], 1965, 487 p.
- [41] Singhal T.S., Jain J.K. GMAW cladding on metals to impart anti-corrosiveness: Machine, processes and materials. *Materials Today: Proceedings*, 2020, v. 26, no. 2, pp. 2432–2441. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.518>
- [42] Tarasov S.M., Kononov G.N. *Kompleksnaya khimicheskaya pererabotka drevesiny. Tekhnologiya lesokhimicheskikh i gidroliznykh proizvodstv* [Complex chemical processing of wood. Technology of forest chemical and hydrolysis production]. Moscow: MGUL, 2016, 122 p.
- [43] Zarubina A.N., Ivankin A.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V. *Kompleksnaya khimicheskaya pererabotka drevesiny* [Complex chemical processing of wood]. Moscow: MGUL, 2016, 37 p.
- [44] Obolenskaya A.V., Yelnitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratornye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose]. Moscow: Ecology, 1991, 320 p.
- [45] GOST RU 9. 908–85. *Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Metally i splavy. Metody opredeleniya pokazateley korrozii i korrozionnoy stoykosti. Mezhgosudarstvennyy standart* [A unified system of protection against corrosion and aging. Metals and alloys. Methods for determining corrosion indicators and corrosion resistance. Interstate standard]. Moscow: Standards Publ., 1985, 79 p.

Authors' information

Oliferenko Galina L'vovna✉ — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), oliferenko2@inbox.ru

Gribanova Anastasiya Konstantinovna — student of the BMSTU (Mytishchi branch), boob1234@icloud.com

Ivankin Andrey Nikolaevich — Dr. Sci. (Chem.), Member of the International Higher Education Academy of Sciences (IHEAS), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), aivankin@bmstu.ru

Vagapov Ruslan Kizitovich — Dr. Sci. (Tech.), Head of the Laboratory of Protection against atmospheric and internal corrosion of the National Scientific and Technical Center for Corrosion Monitoring and Corrosion Protection of Gazprom VNIIGAZ, kizit@rambler.ru

Ustyugov Aleksandr Viktorovich — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of Physical Chemistry named after Ya.K. Syrkin, of the «MIREA — Russian Technological University» (RTU MIREA), ustyugov.alexandr@mail.ru

Received 14.02.2024.

Approved after review 22.11.2024.

Accepted for publication 24.02.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest