

УДК 547.541.2.

DOI: 10.34824/VKNPIRAN.2023.14.3.001

АЗОТСОДЕРЖАЩИЕ ГЕТЕРОЦИКЛЫ В КАЧЕСТВЕ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ

© Бабаев Эльбей Расим оглу (а), Алишанбейли Гюнай Вугар гызы (б)

(а) Институт Химии Присадок, Азербайджан, г. Баку; кандидат химических наук, в.н.с.
лаборатории «Защитные органические соединения», elbeibabaev@yahoo.de

(б) Институт Химии Присадок, Азербайджан, г. Баку; докторант

Аннотация. Азотсодержащие гетероциклические соединения находят широкое применение в различных сферах производства и сельского хозяйства. Они используются в качестве медицинских препаратов в фармакологии и фармакохимии, модификаторы полимерных материалов, в качестве лигандов для каталитических систем, а также наиболее широкое применение они находят в качестве ингибиторов коррозии. В представленной статье показаны результаты исследований в области применения азотсодержащих гетероциклов в качестве ингибиторов коррозии.

Ключевые слова: ингибиторы коррозии, азотсодержащие гетероциклы, триазины, азолы, изатины, пиридины, пирролы.

NITROGEN-CONTAINING HETEROCYCLES AS CORROSION INHIBITORS

© Babayev Elbey Rasim (a), Alishanbeyli Gunay Vugar (b)

(a) Institute of Chemistry of Additives, Azerbaijan, Baku; Candidate of Chemical Sciences, V.N.S.
Laboratory of "Protective Organic Compounds", elbeibabaev@yahoo.de

(b) Institute of Chemistry of Additives, Azerbaijan, Baku; PhD student

Abstract. Nitrogen-containing heterocyclic compounds are widely used in various fields of production and agriculture. They are used as medicines in pharmacology and pharmacochemistry, modifiers of polymeric materials, as ligands for catalytic systems, and they are most widely used as corrosion inhibitors. This article shows the results of research in the field of application of nitrogen-containing heterocycles as corrosion inhibitors.

Key words: corrosion inhibitors, nitrogen-containing heterocycles, triazines, azoles, isatins, pyridines, pyrroles.

Азотсодержащие гетероциклы составляют важный раздел органической химии. Структурное и функциональное разнообразие азотсодержащих гетероциклических соединений обусловлено наличием и природой гетероатома, который оптимизирует соединение для конкретного применения. Было обнаружено, что гетероциклы азота имитируют различные эндогенные метаболиты и натуральные продукты, что подчеркивает их ключевую роль в разработке современных лекарств. Их применение разнообразно и преимущественно используется в качестве фармацевтических препаратов, ингибиторов коррозии, полимеров, агрохимикатов, красителей, проявителей и т.д. Кроме того, их каталитическое поведение сделало эти соединения известными предшественниками в синтезе различных важных органических соединений. Скорость, с которой синтезируются гетероциклы азота, объясняет жизнеспособность и полезность этой области органической химии [1].

Было установлено, что органические соединения, содержащие гетероатомы, проявляют замечательную тенденцию к уменьшению коррозии, которая обеспечивается наличием электронных облаков, состоящих из неподеленных пар, пи-электронов, позволяющих им адсорбироваться по сравнению с металлическими эквивалентами. Из-за наличия азота в виде гетероатомов эти соединения широко используются для уменьшения коррозии. В статье [2] рассматриваются различные гетероциклические органические соединения, такие как имидазол, триазол, пиридин, пирозол, хинолин, тетразол, пиримидин, пурин и пиррол, содержащие азот в качестве основного гетероатома в связи с их антикоррозионными свойствами. Антикоррозионные свойства этих соединений на основе азота в кислых условиях были продемонстрированы с использованием всех доступных экспериментальных методов, таких как EIS, PDP и другие теоретические исследования, такие как DFT и MD. Кроме того, в работе было отмечено и подчеркнуто изменение тенденции ингибирующей эффективности этих соединений.

В работе [3] рассмотрено современное состояние исследований по защите металлов от коррозии в растворах неорганических кислот шестичленными N-содержащими гетероциклическими соединениями. Обсуждаются особенности механизма их защитного действия. Отмечена возможность защиты металла составами, содержащими эти соединения, даже при высокотемпературной коррозии. N-содержащие шестичленные гетероциклические соединения склонны к адсорбции на металлических поверхностях из растворов неорганических кислот. Исходя из значений свободной энергии адсорбции этих ингибиторов коррозии (КИ) на металлических поверхностях, можно с большой долей вероятности считать, что они в основном связаны с металлом физическими силами, но при адсорбции на его поверхности замедляют катодную и анодную реакции, и в конечном итоге препятствуют его коррозии. Наибольший интерес представляют соединения, содержащие атомы S или объемные заместители. Эти соединения сильнее адсорбируются на металлах и ведут себя как более эффективные ИК. Часто бывает, что такие КИ тормозят коррозию металла в растворах HCl, но значительно слабее в H₂SO₄, HClO₄ и H₃PO₄. Известный способ повышения защитного действия N-содержащих шестичленных гетероциклических КИ в этих средах заключается в сочетании их с анионными добавками, например галогенидными или роданид-анионами. Обсуждаемые гетероциклы ведут себя как КИ в «холодных» растворах, но теряют эти свойства при более высоких температурах. В литературе имеются примеры использования шестичленных N-содержащих гетероциклов в качестве КИ различных сталей и цветных металлов (Al, Cu, Sn, Zn и их сплавов). Промышленное применение индивидуальных шестичленных N-содержащих гетероциклов и их производных для защиты металлов в кислых средах малоперспективно и неоправданно. Эти

соединения целесообразнее использовать в составе смесей ингибиторов. Смешанные КИ, содержащие эти соединения, могут препятствовать коррозии даже в таких агрессивных средах, как высокотемпературные растворы HCl или горячие растворы H₃PO₄. Основу для создания перспективных смешанных ингибиторов коррозии металлов в кислотах следует искать среди шестичленных гетероциклических соединений, содержащих два и более атома азота, или соединений, полученных из природного сырья.

Вычислительные методы являются важным инструментом для точного анализа антикоррозионной эффективности органических соединений и их производных. Теория функции плотности, метод Монте-Карло и моделирование молекулярной динамики в основном используются для оценки теоретических свойств органических молекул. В теоретическом исследовании легко предсказываются химическое или физическое взаимодействие, адсорбционный и электронно-донорно-акцепторный механизм между молекулой ингибитора и поверхностью металла. В этой работе [4] были рассмотрены современные тенденции развития азотсодержащих гетероциклических соединений в качестве ингибиторов сырой коррозии.

Среди основных азотсодержащих гетероциклических соединений, используемых в качестве ингибиторов коррозии можно выделить представители следующих классов:

1) Производные азолов

Многие органические ингибиторы коррозии являются сложными и могут включать в себя сложные химические структуры, смесь различных веществ или требовать многочисленных и утомительных стадий приготовления. В работе [5] авторы демонстрируют ингибирование соединениями на основе триазола и имидазола, которые синтезируются одностадийным методом и обладают строгой химической структурой. Ингибирующее действие изучали на коррозию низкоуглеродистой стали в 1,0 М растворе HCl при 40°C методами электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС), потенциодинамической поляризации и потери массы. Результаты электрохимических измерений показали, что ароматические соединения эффективно ингибируют коррозию в кислой среде, так что эффективность ингибирования возрастает с увеличением концентрации ингибитора. Соединение на основе триазола обладало наилучшей ингибирующей активностью (эффективность >90%), за ним следует соединение на основе имидазола (~85%) при концентрации 850 мкМ. Эти результаты были подтверждены анализами, полученными с помощью сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии, которые показали улучшение топологии низкоуглеродистой стали и уменьшение шероховатости поверхности до пяти раз, а также рентгеновской дифракции, которая выявила степень образования оксидного слоя. Кроме того, адсорбция защитного слоя ингибитора на поверхности металла была подтверждена спектроскопией комбинационного рассеяния, в то время как основные режим и механизм были постулированы на основе изотермы ленгмюровской адсорбции и вычислительных исследований, которые показали хорошую корреляцию между ингибирующей способностью и электронодонорной способностью соединений.

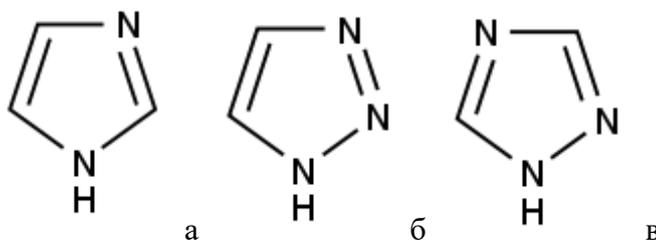


Рис.1. а) имидазол; б) 1,2,3-триазол; в) 1,2,4-триазол

Методами потери веса, газометрии, постоянного и переменного тока изучено влияние различных гетероциклических соединений, содержащих атомы азота, кислорода, серы или селена, на коррозию стали марки 304SS в 2М растворе серной кислоты [6]. Было обнаружено, что эффективность ингибирования исследуемых соединений соответствует порядку 2-метилбензоселеназол (2-МБС) > 2-метилбензотиазол (2-МБТ) > 2-метилбензоксазол (2-МБО) > 2-метилбензимидазол (2-МБИ); изотермы адсорбции следуют изотерме Фрумкина и термодинамической/кинетической модели. Поляризаационные кривые показали, что эти соединения действовали за счет уменьшения доступной площади поверхности без изменения механизма реакции. Стабильность сформированной пленки проверяли методом импеданса переменного тока.

Для борьбы с металлической коррозией и соответствующими нежелательными последствиями применение соединений - ингибиторов коррозии является хорошо известным методом. В связи с этим широкий спектр органических гетероциклических молекул использовался в качестве антикоррозионных агентов для нескольких систем металл/среда. Соединения на основе азола, а именно молекулы N-азола, N и S-азола (т.е. тиазола) и N- и O-азола (т.е. оксазола), а также их производные, продемонстрировали превосходную способность действовать в качестве эффективных ингибиторов коррозии для различных металлов и сплавов в различных агрессивных средах [7]. С этой целью авторы обсуждают возможность применения этих соединений в качестве замедлителей коррозии металлов, а также связанные с ними результаты, отмеченные в последние годы.

В работе [8] ингибирование коррозии низкоуглеродистой стали в 0,5 М соляной кислоте шестью синтезированными азотсодержащими гетероциклическими соединениями изучали с помощью измерения потери массы. Эффективность ингибирования превышала 95%. Отличные характеристики ингибитора объясняются образованием защитной адсорбционной пленки на поверхности стали. Структуры соединений были подтверждены инфракрасным анализом с преобразованием Фурье и ядерно-магнитным резонансом. Адсорбция ингибитора на поверхности стали протекает по изотерме адсорбции Ленгмюра. Квантово-химические расчеты также были приняты для выяснения механизма ингибирования.

Синтезированы N-содержащие производные гетероциклического бензотриазола в качестве нового ингибитора коррозии для мягкой стали, содержащейся в эмульсии, и их ингибирующее поведение для мягкой стали (MS) было исследовано с помощью экспериментов и теоретических расчетов, и это исследование направлено на доказательство того, что два новых ингибитора обладают отличной эффективностью ингибирования коррозии стали [9]. Два соединения 2-(1H-бензо[d][1,2,3] триазол-1-ил)-N,N-диоктилацетамид (BTN) и O-(3-(1H-бензо[d][1,2,3]триазол-1-ил)пропил)S-(2-(диоктиламино)-2-оксоэтил)карбодитиоат (BTSC) в качестве нового ингибитора коррозии, и их ингибирующее поведение в отношении MS, содержащейся в эмульсии, исследованы с помощью гравиметрического эксперимента, электрохимического испытания и теоретические расчеты. Результаты гравиметрического эксперимента, электрохимические тесты показывают, что BTSC демонстрирует отличные характеристики ингибирования и имеет более высокую эффективность ингибирования 96,6%, чем BTN. Полученные адсорбционные пленки из BTN/BTSC, адсорбированные на MS, эффективно ингибируют коррозию MS в основном за счет хемосорбции и следуют изотерме адсорбции Ленгмюра. Экспериментальные и теоретические расчеты показывают, что два новых синтезированных ингибитора являются отличными ингибиторами коррозии для MS, содержащейся в

эмульсии. Электроны ингибиторов в основном фокусируются на атомах С, N, S и O, что свидетельствует о том, что эти атомы являются центрами отрицательного заряда, и они поставляют электроны атомам Fe через координационные связи.

В работе [10] сообщается о многочисленных органических ингибиторах для ингибирования коррозии различных металлов. Установлено, что синтетические гетероциклические соединения, содержащие атомы с высокой электроотрицательностью, такие как азот, сера, кислород или фосфор, очень эффективно предотвращают коррозию металлов. В последние годы развивается тенденция анализа соединений, содержащих 1,2,4-триазольный фрагмент, для ингибирования коррозии металлов, как триазольного ядра, содержащего три атома азота в одном кольце. Целью этой статьи является рассмотрение полезности производных 1,2,4-триазола для ингибирования коррозии различных металлов и сплавов в кислотно-щелочной среде.

Коррозия низкоуглеродистой стали (MS) является глобальной проблемой, которая сильно влияет на промышленную и природную среду. Для продления срока службы приборов необходим контроль MS-коррозии. Для защиты MS от коррозии, особенно в кислой среде, одним из практических и лучших подходов является применение ингибиторов. Производные триазола являются экологически чистыми ингибиторами коррозии (КИ), обладающими незначительной токсичностью, превосходной эффективностью ингибирования (ИЭ) против коррозии MS и чрезвычайно высокой экономической эффективностью. В этом критическом обзоре [11] обсуждается общее влияние температуры, концентрации, времени после применения ХИ и типа кислоты на ИЭ производных триазола. Также в обзоре представлено достаточное количество информации об особенностях КИ; краткое изложение сообщаемых свойств ингибиторов на основе триазола, КИ в промышленности и текущих требований промышленности; и рекомендации и последствия для исследователей по улучшению ИЭ. Кроме того, в обзоре также показаны механизмы действия и ИЭ, которые оцениваются по параметрам потенциодинамической поляризации в различных кислых средах и концентрациях ингибиторов триазола.

2) Производные пиридина

Влияние ароматических колец на способность пиридина, хинолина и 1,10-фенантролина ингибировать коррозию низкоуглеродистой стали исследовали с использованием методов, включая измерение потенциодинамической поляризации (РРМ), спектроскопию электрохимического импеданса (EIS), сканирующую электрохимическую микроскопию (SEM), квантовый расчет и молекулярно-динамическое (МД) моделирование. Результаты показывают, что 1,10-фенантролин лучше всего ингибирует коррозию низкоуглеродистой стали с наивысшей эффективностью 80,40 % при концентрации 10^{-2} М согласно РРМ. Эффективность ингибирования коррозии пиридином и хинолином составляет 46,00 % и 64,00 % соответственно в тех же условиях. Методы EIS и РРМ дают аналогичные результаты. Появление в молекулах ароматических колец и гетероатомов азота значительно улучшает ингибирующую способность ингибиторов к низкоуглеродистой стали. Изучение моделей изотерм адсорбции показывает, что адсорбция пиридина, хинолина и 1,10-фенантролина на поверхности стали протекает по модифицированной изотерме Ленгмюра. Кроме того, теоретическая оценка показывает, что 1,10-фенантролин является лучшим ингибитором по молекулярным параметрам. МД-моделирование не только обеспечивает вид сверху и сбоку на протонированные ингибиторы на поверхности Fe(110), но также рассчитывает их энергию связи в моделируемой среде. В целом результаты теоретических расчетов очень хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями.

В патенте [13] описываются новые соединения, которые можно использовать в качестве ингибиторов коррозии металлов. Соединения представляют собой N-арил- или N-алкилзамещенные галогениды пиридиния, в которых само пиридиновое кольцо дополнительно связано с одним или несколькими гетероатомами, содержащими алкильные или арильные группы.

Эффективность ингибирования коррозии производными пиридина (4-метилпиридин и его четвертичные аммониевые соли) и серосодержащими соединениями (тиомочевина и меркаптоэтанол) с различными молярными соотношениями на углеродистой стали в CO₂-насыщенном 3,5 мас. % растворе NaCl исследовали методами потери массы, потенциодинамической поляризации, электрохимической импедансной спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Синергетический механизм ингибирования коррозии смешанными ингибиторами был выяснен теоретическим расчетом и моделированием. Молекулы производных пиридина с большим объемом преимущественно адсорбируются на поверхности металла, а молекулы серосодержащих соединений с меньшим объемом заполняют вакансии. Плотная адсорбционная пленка будет образовываться при добавлении 4-PQ и серосодержащих соединений в надлежащем молярном соотношении [14].

Гетероциклические соединения на основе азота широко используются в качестве ингибиторов коррозии из-за их способности образовывать прочные координационные связи с атомами металлов [15]. В этой обзорной статье рассмотрено антикоррозионное действие соединений на основе пиридина. В целом производные пиридина с электроноакцепторными и электронодонорными заместителями проявляли более высокий антикоррозионный эффект, чем нативный пиридин. Производные пиридина, содержащие полярные заместители во 2-м и 6-м положениях, образуют высокоустойчивые хелатирующие комплексы. Моно- (2-е положение) и ди- (2-е и 6-е положения) замещенные производные пиридина предпочтительно действуют как бидентатные и тридентатные лиганды соответственно. Изучение литературы показало, что имеются различные отчеты об антикоррозионном поведении органических ингибиторов коррозии на основе пиридина. В целом, изотерма адсорбции и расчетный анализ показывают, что N-гетероциклы на основе пиридина взаимодействуют с металлической поверхностью, используя донорно-акцепторное взаимодействие, и они приобретают относительно плоскую ориентацию на металлической поверхности. На данный момент различные семейства N-гетероциклов на основе пиридина широко используются в качестве ингибиторов коррозии металлов.

3) Производные триазинов

В работе [16] три вида триазинов были синтезированы с помощью реакции конденсации для подавления коррозии в сточных водах нефтяных месторождений. Полученные триазины охарактеризованы методами инфракрасной спектроскопии и газовой хроматографии-масс-спектрометрии и показана их эффективность в качестве экологически чистых ингибиторов коррозии в серосодержащих сточных водах нефтепромыслов. Для этого использовали метод потери массы и теорию твердо-жидкостной адсорбции. Результаты показали, что триазин II был наиболее эффективным ингибитором коррозии из трех, а максимальная эффективность ингибирования триазина II (800 мг/л) может быть выше и достигает 97,66%. Адсорбция ингибитора согласовывалась с предположением Ленгмюра об изотерме адсорбции. Процесс носил самопроизвольный и химический характер адсорбции. Механизм ингибирования коррозии был дополнительно объяснен реакцией десульфуризации и теорией координационных связей, что указывает на то, что триазины могут быть десульфуризаторами для синергизма их ингибирования коррозии в серосодержащих сточных водах нефтяных месторождений. А их легкая

адсорбция на стальной поверхности объясняется образованием азотом связей с атомами кислорода с изолированными электронными парами. Все приведенные выше экспериментальные результаты указывают на то, что они обладают отличными характеристиками по ингибированию коррозии, что позволяет использовать их в сточных водах нефтяных месторождений.

В работе [17] дана сравнительная оценка антикоррозионных свойств производных азолов и триазинов. Гетероциклические соединения, включающие атомы N, O, S и P, обладают превосходным потенциалом ингибирования коррозии благодаря их способности координироваться и связываться с металлическими субстратами. Для предотвращения коррозии в различных экстремальных условиях, таких как кислотное травление, подкисление нефтяных скважин, кислые, кислые и накипные среды, наиболее часто используются азотсодержащие гетероциклические соединения. Гетероциклические соединения на основе азота эффективно адсорбируются на поверхности металла, используя несвязывающие электроны азота и другие места адсорбции. Эти соединения действуют как мощные лиганды. Когда их производные соответствующим образом замещены, они объединяются с металлом и ионами металлов с образованием хелатирующих комплексов, которые защищают металлические соединения от агрессивных сред и, таким образом, предотвращают коррозию. Обзор литературы показывает, что азолы и триазины, а также другие N-гетероциклические соединения, имеющие один, два, три и более атомов азота, особенно эффективно снижают коррозионное воздействие в водных электролитах. Также было рассмотрено образование хелатов гетероциклическими соединениями на основе азота и их способность предотвращать коррозию.

4)Производные изатинов

Три органических ингибитора на основе 5-хлоризатиновых оснований, а именно 1-аллил-5-хлориндолин-2,3-дион (TZACI), 5-хлор-1-(2-(диметиламино)этил)индолин-2,3-дион (TZCDI), 5-хлор-1-октилиндолин-2,3-дион (TZCOI) оказывали влияние на ингибирование коррозии мягкой стали в 1,0 М растворе соляной кислоты [18]. Эффективность ингибирования увеличивалась с увеличением концентрации соединения в случае этих трех ингибиторов, которые имеют поведение смешанного типа, предполагаемое поляризационными исследованиями. Измерения импеданса показали, что после добавления ингибиторов сопротивление переносу заряда увеличилось, а емкость двойного слоя уменьшилась, что привело к увеличению эффективности ингибирования. Адсорбция трех ингибиторов на поверхности стали подчинялась модели Ленгмюра. Свободная энергия адсорбции показала, что тип адсорбции был физическим для TZACI и химическим для TZCDI, TZCOI. Сканирующий электронный микроскопический анализ подтверждает образование защитной пленки на поверхности.

В работе [19] описывается синтез и характеристика изатинового основания Шиффа, а именно 2-(2-оксоиндолин-3-илиден) гидразинкарботиоамида (ОНВ). Химическая структура ОНВ была установлена с помощью методов протонно-ядерного магнитного резонанса (¹H-ЯМР), углеродно-ядерного магнитного резонанса (¹³C ЯМР) и инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FT-IR). ОНВ оценивали на его способность ингибировать коррозию на образцах из мягкой стали в 1 М HCl с использованием гравиметрических методов и электрохимических измерений, таких как спектроскопия электрохимического импеданса (EIS) и потенциодинамических методов, дополненных микроскопическим анализом. Результаты показали, что ОНВ является ингибитором смешанного типа и показал хорошее ингибирование коррозии с максимальной эффективностью ингибирования коррозии 96,7% при концентрации 0,5 мМ и 303 К. Эффективность ингибирования увеличивалась с увеличением концентрации

ОНВ и снижалась с повышением температуры. Эффективность ингибирования связывали с образованием защитной пленки на поверхности испытуемого образца из мягкой стали. Исследования электрохимического импеданса также показали, что сопротивление переносу заряда увеличивается с увеличением концентрации ОНВ. Морфологический анализ подтвердил эффективность ингибирования ОНВ, и защитная барьерная пленка соответствовала адсорбции монослоя Ленгмюра. Экспериментальные и теоретические кинетика и термодинамические параметры коррозии согласуются и показывают, что на поверхности мягкой стали образуется адсорбционная пленка координационных связей Fe-N.

Однако, наши исследования показывают, что наибольшую ингибиторную активность проявляют гетероциклические соединения, имеющие в своем составе два и более гетероатома, в частности атомы азота и серы. В наших исследованиях был осуществлен синтез гетероароматических циклических соединений с двумя гетероатомами – атомами серы и азота. Показано, что эти соединения обладают высокой биоцидной и ингибиторной активностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Andleeb A., Tanzeela Q., Sharma K., Jeelani I. A Review on The Medicinal And Industrial Applications of N-Containing Heterocycles // *Applied Chemistry*. 2022. Vol. 16. Pp. 154-191
2. Batra R., Singh A.K., Thakur S., Pani B. Advancement of corrosion inhibitor system through N-heterocyclic compounds: a review // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. 2023. Vol. 48. N 1. Pp. 73-101
3. Avdeev Ya.G. Nitrogen-containing six-membered heterocyclic compounds as corrosion inhibitors for metals in solutions of mineral acids – A review // *Inter. J. Corrosion Scale Inhib.* 2018. Vol. 7. N 4. Pp. 460-497
4. Sahu R., Verma D.K., Berdimurodov E. Chapter 19 - Nitrogen-containing heterocyclic compounds as green corrosion inhibitors // *Computational Modelling and Simulations for Designing of Corrosion Inhibitors*. 2023. N 1. Pp. 373-394
5. Caldona E.B., Zhang M., Liang G., Hollis T.K. Corrosion inhibition of mild steel in acidic medium by simple azole-based aromatic compounds // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2021. Vol. 880. N 1. Pp. 113848-114867
6. Al-Mayout A.M., Al-Suhybani A.A., Al-Ameery A.K. Corrosion inhibition of 304SS in sulfuric acid solutions by 2-methyl benzoazole derivatives // *Desalination*. 1998. Vol. 116. N 1. Pp. 25-33
7. El-Ibrahimi B., Guo L. Azole-Based Compounds as Corrosion Inhibitors for Metallic Materials // Chapter 1. In book *Azoles - Synthesis, Properties, Applications and Perspectives*. 2020. 184 p.
8. Ahmed S., Wassan A., Khadom A. Synthesis and investigations of heterocyclic compounds as corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid // *International Journal of Industrial Chemistry*. 2019. N 2. Pp. 131-147
9. Xiong S., Wu H., Zhiyuan L. N-containing heterocyclic benzotriazole derivatives as new corrosion inhibitor for mild steel contained in emulsion // *AntiCorrosion Methods and Materials*. 2022. Vol. 69. N 2. Pp. 183-193
10. Swathi N.P., Alva V., Samshuddin S. A Review on 1,2,4-Triazole Derivatives as Corrosion Inhibitors // *Journal of Bio- and TriboCorrosion*. 2017. Vol. 3. Pp. 42-49

11. Faisal M., Saeed A., Shahzad D., Abbas N. General properties and comparison of the corrosion inhibition efficiencies of the triazole derivatives for mild steel // *Corrosion Reviews*. 2018. Vol. 36. N 6. Pp. 6-27
12. Nguyen H.N., Huong D.O. Effect of Aromatic Rings on Mild Steel Corrosion Inhibition Ability of Nitrogen Heteroatom-Containing Compounds // *Journal of Molecular Structure*. 2022. N 12. Pp. 1-34
13. Pat. 5132093A. US. 1990 Synergistic corrosion inhibitors based on substituted pyridinium compounds / Hetharachchi S., Narang S.C., MacDonald D. /
14. Tang J., Yuxin H., Han Z., Wang X. Experimental and Theoretical Study on the Synergistic Inhibition Effect of Pyridine Derivatives and Sulfur-Containing Compounds on the Corrosion of Carbon Steel in CO₂-Saturated 3.5 wt.% NaCl Solution // *Molecules*. 2018. Vol. 23. N 12. Pp. 3270-3279
15. Verma Ch., Rhee K., Quraishi M.A., Ebenso E. Pyridine based N-heterocyclic compounds as aqueous phase corrosion inhibitors: A review // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2020. Vol. 117. Pp. 265-277
16. Wang P., Xuefan G., Quande W., Dong J. Corrosion inhibition of triazines in sulfur-containing oilfield wastewater // *Desalination and Water Treatment*. 2021. Vol. 235. Pp. 107-116
17. Chandrabhan V., Thakur A., Ganjoo R., Sharma Sh. Coordination bonding and corrosion inhibition potential of nitrogen-rich heterocycles: Azoles and triazines as specific examples // *Coordination Chemistry Reviews*. 2023. Vol. 488. N 8. Pp. 215177-215182
18. Tribak Z., Skalli M.Kh., Haoudi A., Rodi Y. Comparative Studies on the Corrosion Inhibition of Three Different Organic Heterocyclic Compounds as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Hydrochloric Acid // *J. of the Mexican Chemical Society*. 2020. Vol. 64. N 4. Pp. 113-119
19. Al-Amiery A., Al-Azzawi W.Kh., Roslam W. Isatin Schiff base is an effective corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution: gravimetric, electrochemical, and computational investigation // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Pp. 17773-17782

REFERENCES

1. Andleeb A., Tanzeela Q., Sharma K., Jeelani I. A Review on The Medicinal And Industrial Applications of N-Containing Heterocycles // *Applied Chemistry*. 2022. Vol. 16. Pp. 154-191
2. Batra R., Singh A.K., Thakur S., Pani B. Advancement of corrosion inhibitor system through N-heterocyclic compounds: a review // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. 2023. Vol. 48. N 1. Pp. 73-101
3. Avdeev Ya.G. Nitrogen-containing six-membered heterocyclic compounds as corrosion inhibitors for metals in solutions of mineral acids – A review // *Inter. J. Corrosion Scale Inhib.* 2018. Vol. 7. N 4. Pp. 460-497
4. Sahu R., Verma D.K., Berdimurodov E. Chapter 19 - Nitrogen-containing heterocyclic compounds as green corrosion inhibitors // *Computational Modelling and Simulations for Designing of Corrosion Inhibitors*. 2023. N 1. Pp. 373-394
5. Caldona E.B., Zhang M., Liang G., Hollis T.K. Corrosion inhibition of mild steel in acidic medium by simple azole-based aromatic compounds // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2021. Vol. 880. N 1. Pp. 113848-114867

6. Al-Mayout A.M., Al-Suhybani A.A., Al-Ameery A.K. Corrosion inhibition of 304SS in sulfuric acid solutions by 2-methyl benzoazole derivatives // *Desalination*. 1998. Vol. 116. N 1. Pp. 25-33
7. El-Ibrahimi B., Guo L. Azole-Based Compounds as Corrosion Inhibitors for Metallic Materials // Chapter 1. In book *Azoles - Synthesis, Properties, Applications and Perspectives*. 2020. 184 p.
8. Ahmed S., Wassan A., Khadom A. Synthesis and investigations of heterocyclic compounds as corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid // *International Journal of Industrial Chemistry*. 2019. N 2. Pp. 131-147
9. Xiong S., Wu H., Zhiyuan L. N-containing heterocyclic benzotriazole derivatives as new corrosion inhibitor for mild steel contained in emulsion // *AntiCorrosion Methods and Materials*. 2022. Vol. 69. N 2. Pp. 183-193
10. Swathi N.P., Alva V., Samshuddin S. A Review on 1,2,4-Triazole Derivatives as Corrosion Inhibitors // *Journal of Bio- and TriboCorrosion*. 2017. Vol. 3. Pp. 42-49
11. Faisal M., Saeed A., Shahzad D., Abbas N. General properties and comparison of the corrosion inhibition efficiencies of the triazole derivatives for mild steel // *Corrosion Reviews*. 2018. Vol. 36. N 6. Pp. 6-27
12. Nguyen H.N., Huong D.O. Effect of Aromatic Rings on Mild Steel Corrosion Inhibition Ability of Nitrogen Heteroatom-Containing Compounds // *Journal of Molecular Structure*. 2022. N 12. Pp. 1-34
13. Pat. 5132093A. US. 1990 Synergistic corrosion inhibitors based on substituted pyridinium compounds / Hetharachchi S., Narang S.C., MacDonald D. /
14. Tang J., Yuxin H., Han Z., Wang X. Experimental and Theoretical Study on the Synergistic Inhibition Effect of Pyridine Derivatives and Sulfur-Containing Compounds on the Corrosion of Carbon Steel in CO₂-Saturated 3.5 wt.% NaCl Solution // *Molecules*. 2018. Vol. 23. N 12. Pp. 3270-3279
15. Verma Ch., Rhee K., Quraishi M.A., Ebenso E. Pyridine based N-heterocyclic compounds as aqueous phase corrosion inhibitors: A review // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2020. Vol. 117. Pp. 265-277
16. Wang P., Xuefan G., Quande W., Dong J. Corrosion inhibition of triazines in sulfur-containing oilfield wastewater // *Desalination and Water Treatment*. 2021. Vol. 235. Pp. 107-116
17. Chandrabhan V., Thakur A., Ganjoo R., Sharma Sh. Coordination bonding and corrosion inhibition potential of nitrogen-rich heterocycles: Azoles and triazines as specific examples // *Coordination Chemistry Reviews*. 2023. Vol. 488. N 8. Pp. 215177-215182
18. Tribak Z., Skalli M.Kh., Haoudi A., Rodi Y. Comparative Studies on the Corrosion Inhibition of Three Different Organic Heterocyclic Compounds as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Hydrochloric Acid // *J. of the Mexican Chemical Society*. 2020. Vol. 64. N 4. Pp. 113-119
19. Al-Amiery A., Al-Azzawi W.Kh., Roslam W. Isatin Schiff base is an effective corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution: gravimetric, electrochemical, and computational investigation // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Pp. 17773-17782