



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 620.193

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11396>

Оценка ингибирующего действия некоторых производных солей длинноцепочечных карбоновых кислот по отношению к питтинговой коррозии арматурной стали в бетоне

О. А. Козадеров[✉], Д. С. Шевцов, М. А. Потапов, И. Д. Зарцын, С. Н. Грушевская, А. А. Кружилин, Е. А. Ильина, К. А. Ткаченко, Х. С. Шихалиев

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,
Университетская пл. 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

Аннотация

Синтезированы производные солей длинноцепочечных карбоновых кислот и диметиламинопропиламина, в том числе близких по составу с растительными маслами.

Структура молекул новых веществ надежно подтверждена с применением физических методов ИК-Фурье спектроскопии, ЯМР-спектроскопии и ВЭЖХ. С применением вольтамперометрии проведена оценка ингибирующего действия синтезированных веществ по отношению к арматурной стали марки 35ГС. Эксперименты проводили в водном экстракте из строительного раствора, имитирующем поровую жидкость бетона, в присутствии хлоридов в качестве активаторов питтинговой коррозии, а также в образцах мелкозернистого бетона при периодическом погружении в хлоридный раствор. Обнаружено, что 3-(диметиламино)пропил-1-аммония стеарат не проявляет ингибирующего действия. Введение же солей жирных кислот кокосового и подсолнечного масел увеличивает антикоррозионные свойства. Степень защиты составляет 40–44 % в водных растворах и 30–32 % - для бетонных образцов.

Установлено увеличение времени до начала коррозии в бетонных образцах в 1.75 раза по сравнению с контрольным составом без добавок.

Ключевые слова: арматурная сталь, железобетон, ингибиторы коррозии, хлориды, соли длинноцепочечных карбоновых кислот

Источник финансирования: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ), проект № 22-23-01144, <https://rscf.ru/en/project/22-23-01144/>

Для цитирования: Козадеров О. А., Шевцов Д. С., Потапов М. А., Зарцын И. Д., Грушевская С. Н., Кружилин А. А., Ильина Е. А., Ткаченко К. А., Шихалиев Х. С. Оценка ингибирующего действия некоторых производных солей длинноцепочечных карбоновых кислот по отношению к питтинговой коррозии арматурной стали в бетоне. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(3): 445–453. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11396>

For citation: Kozaderov O. A., Shevtsov D. S., Potapov M. A., Zartsyn I. D., Grushevskaya S. N., Kruzhilin A. A., Ilina E. A., Tkachenko K. A., Shikhaliev Kh. S. Оценка ингибирующего действия некоторых производных солей длинноцепочечных карбоновых кислот по отношению к питтинговой коррозии арматурной стали в бетоне. *Condensed Matter and Interphases*. 2023;25(3): 445–453. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11396>

✉ Козадеров Олег Александрович, e-mail: ok@chem.vsu.ru

© Козадеров О. А., Шевцов Д. С., Потапов М. А., Зарцын И. Д., Грушевская С. Н., Кружилин А. А., Ильина Е. А., Ткаченко К. А., Шихалиев Х. С., 2023



1. Введение

Железобетон широко применяется при строительстве промышленных и гражданских объектов (транспортные сооружения, градирни АЭС, дамбы, причалы и т. д.). Коррозия арматурной стали является основной причиной выхода из строя железобетонных конструкций [1]. Наиболее распространенной и опасной с точки зрения эксплуатации является коррозия, вызванная действием хлоридов [2], которые содержатся в большом количестве в морской воде и солях-антиобледенителях. Опасность заключается в локальном характере деградации стали (питтинги, язвы), которая в относительно короткий период времени может привести к разрушению конструкции, поскольку выявить локальные поражения традиционными методами мониторинга (например, при визуальном осмотре) весьма затруднительно.

Мероприятия по первичной защите от коррозии железобетона на стадии изготовления включают в себя подбор оптимального его состава [3], а для повышения коррозионной стойкости арматурной стали зачастую применяют добавки-ингибиторы [4]. При этом вопрос экологической нагрузки при их использовании сохраняет свою актуальность. Неоднократно [5, 6] упоминалось о негативном воздействии на среду нитритов, хроматов, бензотриазола, несмотря на довольно высокие защитные свойства [7–10]. Для решения данной проблемы предлагаются к использованию так называемые «зеленые» ингибиторы коррозии [11]. Преимущественно они представляют собой экстракты продуктов растительного происхождения: листья и стебли [12–14], плоды [15], отходы продуктов переработки [16, 17]. Подразумевается, что входящие в состав экстракта компоненты имеют естественное происхождение и разлагаются при попадании в окружающую среду без нанесения вреда. Представленные в опубликованных работах результаты убедительно доказывают перспективность применения некоторых экстрактов в качестве ингибиторов в кислотных, нейтральных и щелочных средах, которые обеспечивают степень защиты более 80–90 %.

Развитием такого подхода при поиске новых ингибиторов коррозии является модификация продуктов крупнотоннажного производства (растительные масла: подсолнечное, кокосовое; отходы пищевых и промышленных производств и т. д.) путем одностадийного органического синтеза [18]. При этом решается вопрос рациональной утилизации отходов (или снижения затрат от

применения недорогих компонентов) и достигается повышение защитных свойств, растворимости или иных характеристик за счет введения соответствующих функциональных групп. Известны примеры модификации соевого, пальмового и касторового масел имидазолинами [19] со значениями степени защиты более 80 % низкоуглеродистой стали в 1М HCl. При этом отмечено более выраженное защитное действие относительно производных на основе индивидуальных карбоновых кислот с длиной алкильного радикала C12, C18 (степень защиты от 60 %). В работе [20] исследовали производные кукурузного, соевого, подсолнечного масел и говяжьего жира с ди- и триэтаноломином для стали в кислой среде, моделирующей условия бурового раствора при нефтедобыче. В большинстве исследованных комбинаций были получены защитные эффекты до 40–50 % (для нескольких комбинаций до 80 %). Примеры результатов с различным ингибирующим эффектом позволяют исследователям учитывать уже имеющийся опыт и соответствующим образом выбирать способы модификации природных соединений, условия проведения коррозионных тестов для получения наибольшей степени защиты.

Известны примеры эффективного действия короткоцепочечных карбоновых кислот и их солей для защиты арматурной стали от коррозии, вызванной хлоридами. В [21] установлена степень защиты для сукцината натрия на уровне 55–77 % в модельном водном растворе при концентрации хлоридов 0.6М. Авторы [22] показали снижение эффективности защитного действия в ряду солей малонат > формиат > ацетат > пропионат образцах мелкозернистого бетона. В [23] выявлено повышение защитных свойств бетона при добавлении длинноцепочечных карбоновых кислот в ходе циклов замораживания/оттаивания при наличии хлоридов. При этом отсутствуют упоминания о применении модифицированных длинноцепочечных карбоновых кислот или растительных масел при решении аналогичных задач.

Цель работы – синтез и оценка ингибирующего действия новых производных солей длинноцепочечных карбоновых кислот и диметиламинопропиламина, в том числе близких по составу с растительными маслами, по отношению к низкоуглеродистой арматурной стали в водном хлоридном растворе, моделирующем среду бетона, а также образцах мелкозернистого бетона при периодическом погружении в хлоридный раствор.

2. Экспериментальная часть

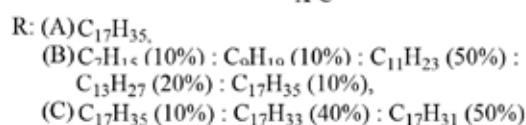
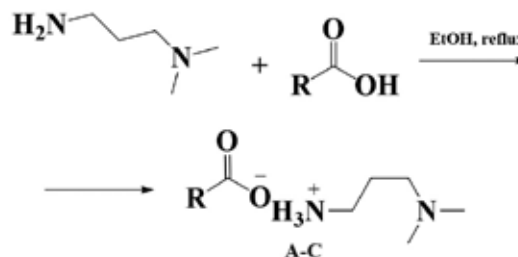
2.1. Синтез и анализ производных диметиламинопропиламина

В качестве ингибиторов хлоридной коррозии железобетона получены аммонийные соли диметиламинопропиламина со стеариновой кислотой и смесями жирных кислот, моделирующими состав растительных масел (кокосового и подсолнечного) (табл. 1). Выбор смесей обусловлен необходимостью оценки возможности использования растительного сырья для получения ингибиторов данного класса. Все использованные реактивы приобретены в компании Acros Organics.

Для анализа получаемых веществ использовали высокоэффективную жидкостную хроматографию с масс-спектрометрическим детектированием высокого разрешения при электрораспылительной ионизации (ВЭЖХ-HRMS-ESI) в сочетании с УФ-детектированием. Устройство состояло из жидкостного хроматографа Agilent 1269 Infinity и времяпролетного масс-детектора высокого разрешения Agilent 6230 TOF LC/MS. Количественное определение проводили методом внутреннего стандарта. Спектры ЯМР¹H регистрировали на спектрометре Bruker AV600 (600,13 МГц) в DMSO-d₆, внутренним стандартом был TMS. ИК-спектр записан на ИК-Фурье спектрометре Vertex 70 с использованием приставки НПВО Platinum ATR (Bruker), оснащенной алмазной призмой, в диапазоне частот от 4000 до 400 см⁻¹ с разрешением 2 см⁻¹. Результат получен путем усреднения 16 сканов.

Установлено, что в отсутствие катализаторов при кипячении в этиловом спирте эквимольных количеств диметиламинопропиламина и соот-

ветствующих карбоновых кислот (либо из смесей) протекает реакция нейтрализации с практически количественными выходами соответствующих аммониевых солей. Это подтверждается данными LC/MS-спектрометрии, ЯМР¹H-, ИК-спектроскопии.



2.2. Методика синтеза аммонийных солей карбоновых кислот А-С

Смесь 1 моль кислоты (в случае смесей суммарное количество вещества всех кислот должно составлять 1 моль) и 1 моль амина в 50 мл этилового спирта кипятили до полного растворения компонентов. Контроль за полнотой проведения реакции осуществляли по универсальному индикатору и ТСХ. После завершения процесса нейтрализации полученный гомогенный раствор упаривали от растворителя на ротационном испарителе.

3-(диметиламино)пропил-1-аммония стеарат А. Выход 96 %, вязкая янтарная паста. ¹H ЯМР (δ): 0.89–0.93 (t, 3H CH₃), 1.17–1.91 (m, 34H 15CH₂+βCH₂+CH₂), 2.23–2.30 (s, 6H 2CH₃), 2.61–2.67 (m, 2H CH₂), 2.91–2.95 (m, 2H CH₂). ИК-спектр (см⁻¹): 3300–3400 (OH + N⁺-H), 2150–2200 (N⁺-H),

Таблица 1. Список исследованных ингибиторов

Обозначение	Наименование	Формула
A	3-(диметиламино)пропил-1-аммония стеарат	
B	3-(диметиламино)пропил-1-аммонийные соли жирных кислот кокосового масла	 R: C ₇ H ₁₅ (10%) : C ₉ H ₁₉ (10%) : C ₁₁ H ₂₃ (50%) : C ₁₃ H ₂₇ (20%) : C ₁₇ H ₃₅ (10%),
C	3-(диметиламино)пропил-1-аммонийные соли жирных кислот подсолнечного масла	 R: C ₁₇ H ₃₅ (10%) : C ₁₇ H ₃₃ (40%) : C ₁₇ H ₃₁ (50%)

1700–1750 (C=O), 1550–1600 (COO⁻ + C-O-H), 1550 (N⁺H), 1400 (N⁺H), 900–1150 (CH₂), 750–800 (CH₂), 500–580 (CH₃), m/z (M+H): найдено 386.2841, рассчитано 386.3872.

1-аммонийные соли жирных кислот кокосового масла В. Выход 94 %, вязкая янтарная жидкость. ¹H ЯМР (δ): 0.89–0.93 (t, 3H CH₃), 1.17–1.91 (m, 34H 15CH₂+βCH₂+CH₂), 2.23–2.30 (s, 6H 2CH₃), 2.61–2.67 (m, 2H CH₂), 2.91–2.95 (m, 2H CH₂).

1-аммонийные соли жирных кислот подсолнечного масла С. Выход 85 %, вязкая янтарная жидкость. ¹H ЯМР (δ): 0.89–0.93 (t, 3H CH₃), 1.17–1.91 (m, 34H 15CH₂+βCH₂+CH₂), 2.23–2.30 (s, 6H 2CH₃), 2.61–2.67 (m, 2H CH₂), 2.91–2.95 (m, 2H CH₂).

2.3. Оценка защитного действия

Для оценки защитного действия синтезированных соединений использовали электрохимические методы. Образцы низкоуглеродистой стали 35ГС прямоугольного сечения применяли в качестве рабочего электрода. Все поверхности, за исключением рабочей, армировали в эпоксидную смолу. Насыщенный хлоридсеребряный электрод сравнения (х.с.э., потенциал +201 мВ относительно стандартного водородного электрода) размещали в отдельном сосуде, соединенном с электрохимической ячейкой электролитическим ключом на основе агар-агара, заполненным насыщенным раствором KNO₃. Потенциалы в работе приведены относительно х.с.э. Вспомогательный электрод – платиновая сетка.

В качестве рабочего раствора применяли водный экстракт из порошка цемента (соотношение однократно дистиллированной воды и порошка цемента 1:10 по массе, экстракция в течение 24 ч с последующей фильтрацией, pH 12.5–13.0). Электрохимические измерения проводили в трехэлектродной стеклянной ячейке с неразделенными электродными пространствами при температуре 23±3 °С в условиях естественной аэрации, в присутствии активирующей добавки NaCl с концентрацией 1.00 моль·дм⁻³ (контрольный эксперимент), а также при добавлении исследуемых веществ. За счет длинноцепочечных алкильных компонентов они характеризуются невысокой растворимостью в водных растворах. В связи с этим исследовали их эффект при наиболее высокой концентрации, которая для всех веществ составила 0.1 г·дм⁻³.

Рабочий стальной электрод предварительно зачищали на наждачной бумаге K2000, промывали дистиллированной водой и обезжиривали химически чистым изопропиловым спиртом.

Плотность тока *i* рассчитывали делением регистрируемой силы тока *I* на геометрическую площадь рабочего электрода (2.25 см²).

Для экспериментов в бетоне использовали отрезки низкоуглеродистой стали 35ГС периодического профиля длиной ≈100 мм и диаметром 6 мм. К одному концу стержня припаивали медный изолированный токовод. Место пайки покрывали эпоксидной смолой. Поверхность электродов зачищали наждачной бумагой P1000 (абразив Al₂O₃ с размером частиц 14–20 мкм) до степени St3 по ISO 8501–1:2014 и обезжиривали этиловым спиртом (96 %).

Строительный раствор на основе цементно-песчаной смеси готовили из цемента марки М500 по ГОСТ 10178-85. Водоцементное соотношение (w/c) составляло 0.50; массовое соотношение цемента и песка составляло 1:3. Формировали образцы-призмы размером 160×40×40 мм с расположением электрода вдоль оси. Извлечение из опалубки производили через 7 суток. Отверждение образцов происходило в течение 28 дней при 100 % влажности. Добавки синтезированных веществ вводили вместе с водой затворения в количестве (относительно массы воды), аналогичном экспериментах в водных растворах.

Во время эксперимента образцы раствора погружали в 3 % водный раствор NaCl в течение одних суток. Затем их переносили в лабораторную атмосферу с естественной относительной влажностью 35±5 % и температурой 22±2 °С, где их сушили в течение шести суток. После чего цикл повторяли.

Плотность тока коррозии (*i*_{cor}) определяли методом поляризационного сопротивления (PR) по Ф. Мансфельду [24]. После установления стационарного значения потенциала свободной коррозии (*E*_{cor}) в течение 30 минут, регистрировали поляризационную кривую с помощью потенциостата IPC-Pro в потенциодинамическом режиме (скорость сканирования потенциала 0.2 мВ·с⁻¹) в диапазоне от *E*_{cor} – 30 мВ до *E*_{cor} + 30 мВ.

Способность исследуемых веществ снижать скорость коррозии оценивали по величине степени защиты, которую рассчитывали по формуле:

$$Z_i = \frac{i_{cor,0} - i_{cor,inh}}{i_{cor,0}} \cdot 100 \%,$$

где *i*_{cor,0} и *i*_{cor,inh} – плотности тока коррозии в контрольном эксперименте и в присутствии ингибитора соответственно.

Для бетонных образцов в качестве критериев эффективности рассмотрены увеличение количества циклов до потери пассивного состояния относительно контрольных образцов без добавки и степень защиты (Z_Q) на основании оценки электрического заряда Q . Величину Q определяли как площадь криволинейной трапеции для функции плотности тока коррозии от времени эксперимента. Значение Z_Q определяли по формуле:

$$Z_Q = \left(1 - \frac{Q_0}{Q_{inh}} \right) \cdot 100 \%,$$

где Q_0 и Q_{inh} – электрический заряд в контрольном эксперименте и в присутствии ингибитора соответственно.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Потенциодинамические измерения в водной вытяжке из бетона

Введение всех изученных веществ незначительно, на 11–35 мВ, смещает E_{cor} в область положительных значений (табл. 2), что свидетельствует о преимущественном влиянии на анодную парциальную реакцию окисления металла [25]. Это также подтверждается при сравнении начальных участков поляризационных кривых (ПК). Катодные участки ПК для всех соединений совпадают с контрольным экспериментом без добавки (рис. 1). Для соединения А анодные участки ПК близки (рис. 1а), при одинаковом значении поляризации снижение плотности тока составляет не более 5 %. Добавка ве-

Таблица 2. Кинетические параметры низкоуглеродистой стали в водной вытяжке из цемента + 1.00 моль·дм⁻³ NaCl в присутствии

Ингибитор	C_{inh} , г·дм ⁻³	E_{cor} , мВ	R_p , КОМ·см ²	b_a , мВ	b_c , мВ	B , мВ	i_{cor} , мкА·см ⁻²	Z_p , %
контрольный	–	–451	9.21	64.3	63.0	31.8	3.44±0.36	–
А	0.1	–442	7.80	55.8	43.5	24.0	3.02±0.16	12
В	0.1	–416	10.75	58.6	35.2	22.0	2.06±0.13	40
С	0.1	–436	11.13	58.2	33.9	21.0	1.93±0.23	44

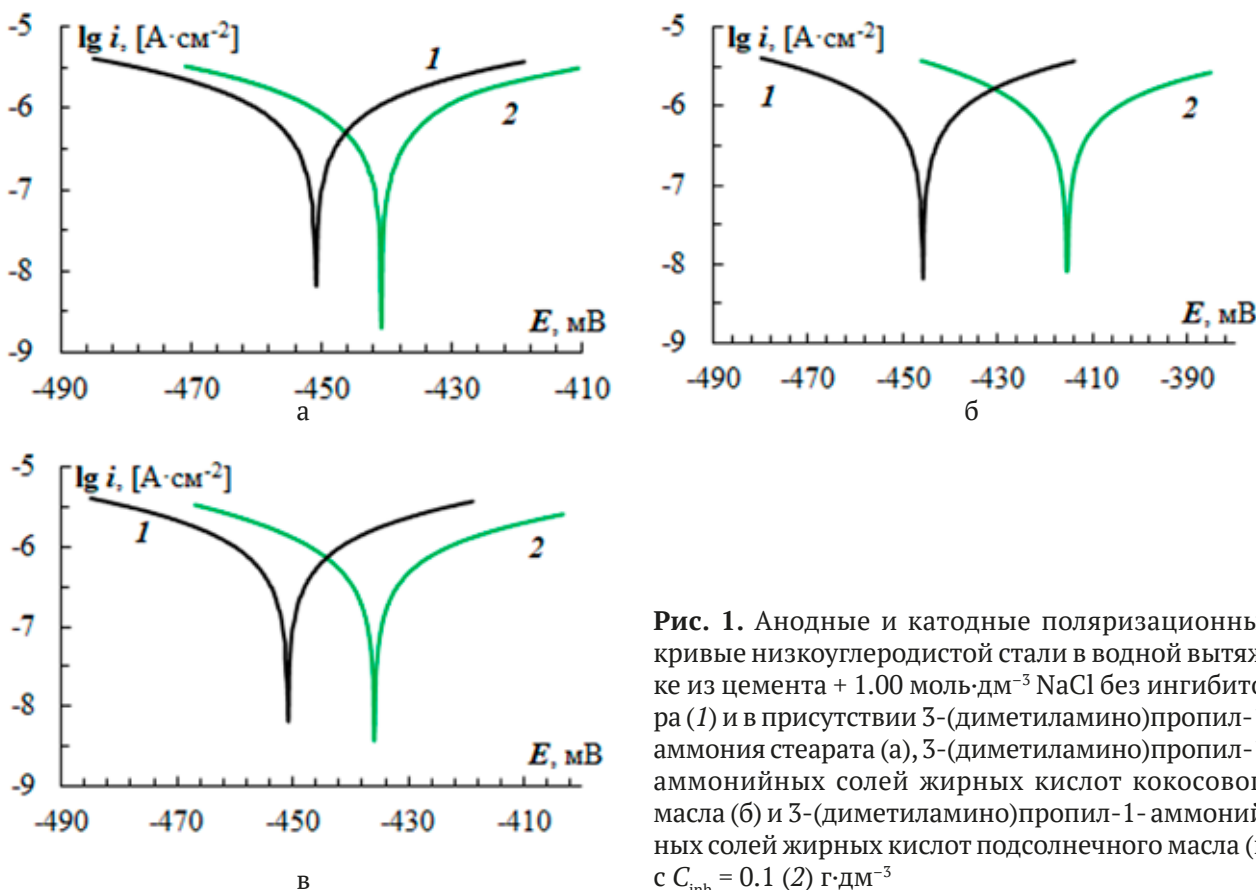


Рис. 1. Анодные и катодные поляризационные кривые низкоуглеродистой стали в водной вытяжке из цемента + 1.00 моль·дм⁻³ NaCl без ингибитора (1) и в присутствии 3-(диметиламино)пропил-1-аммония стеарата (а), 3-(диметиламино)пропил-1-аммонийных солей жирных кислот кокосового масла (б) и 3-(диметиламино)пропил-1-аммонийных солей жирных кислот подсолнечного масла (в) с $C_{inh} = 0.1$ (2) г·дм⁻³

ществ **B** и **C** вызывает снижение плотности тока на анодных участках ПК на 25 и 38 % соответственно (рис. 1б, в).

Результаты расчетов электрохимических параметров по методу поляризационного сопротивления представлены в табл. 2 и согласуются с данными анализа поляризационных кривых. Для вещества **A** значение Z_i получено на уровне 12 %. Для смесевых добавок **B** и **C** степень защиты выше и составляет 40 и 44 % соответственно.

С учетом полученных предварительных результатов в модельных растворах были изготовлены образцы мелкозернистого бетона (далее бетона) для наиболее эффективных соединений **B** и **C**.

3.2. Потенциодинамические измерения в образцах мелкозернистого бетона

Для образцов бетона без добавок нарушение пассивного состояния получено в насыщенном влагой и сухом состоянии через четыре цикла погружения на пятый (рис. 2а, б, кривые 1). Это сопровождается достижением или превышением порогового значения $i_{cor} = 0.1$ мкА·см⁻² [26]. Введение изученных добавок в количестве 0.1 г·дм⁻³ относительно количества воды затворения увеличивает количество циклов погружения в хлоридный раствор. Для веществ **B** и **C** активация установлена между седьмым и восьмым погружением для насыщенного состояния и восьмым и девятым для воздушно-сухого (рис. 2а, б, кривые 2). Таким образом, введение исследу-

емых добавок увеличивает период времени до начала коррозии в 1.75 раза.

Дальнейшее изменение рассчитанных значений i_{cor} также свидетельствует о проявлении ингибирующего действия. В общем случае i_{cor} для бетонов с добавками не превышает величин для контрольных образцов.

Результаты расчета электрического заряда представлены в табл. 3. По прошествии 100 суток эксперимента после 15 циклов погружения в хлоридный раствор степень защиты для добавок **B** и **C** близки и составляют 31 и 32 % соответственно.

Таблица 3. Оценка величины электрического заряда по данным скорости коррозии

Ингибитор	Q, Кл·см ⁻²	Z _Q , %
контрольный	2.16±0.16	–
B	1.50±0.12	30.6
C	1.47±0.13	31.9

4. Выводы

Осуществлен синтез и подтверждена структура производных солей длинноцепочечных карбоновых кислот и диметиламинопропиламина, в том числе близких по составу с растительными маслами.

С применением электрохимических методов исследования оценена способность синтезированных соединений к ингибированию процесса коррозии арматурной стали в растворе, моделирующем поровую жидкость бетона в присутст-

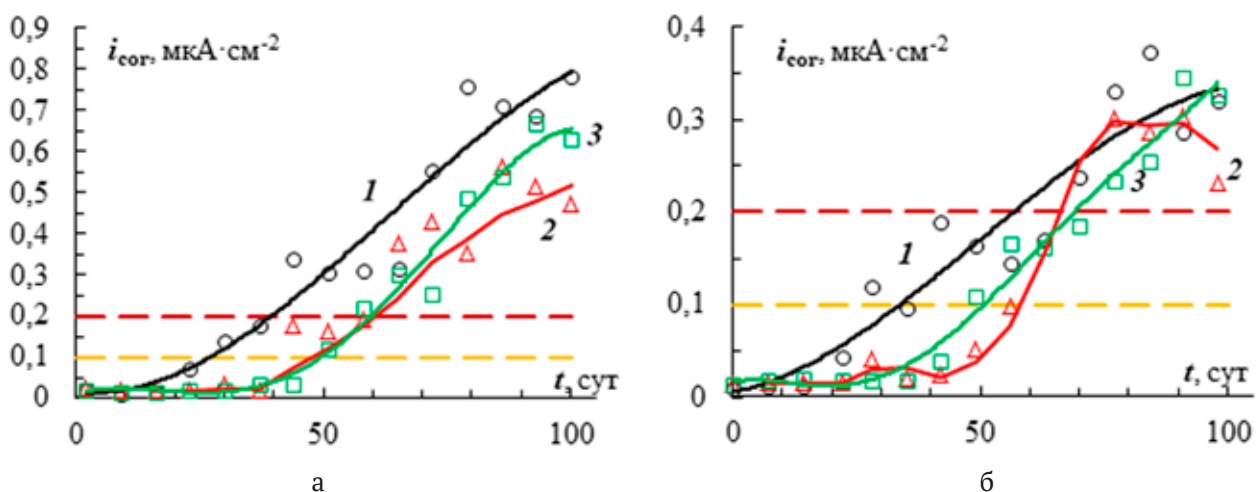


Рис. 2. Изменение i_{cor} арматурной стали в мелкозернистом бетоне в насыщенном влагой состоянии (а) и воздушно-сухом (б) без добавки (1) с добавками 3-(диметиламино)пропил-1-аммонийных солей жирных кислот кокосового масла (2), 3-(диметиламино)пропил-1-аммонийных солей жирных кислот подсолнечного масла (3)

вии хлоридов, а также в образцах мелкозернистого бетона. Показано, что 3-(диметиламино)пропил-1-аммония стеарат практически не проявляет ингибирующего действия.

Для соли жирных кислот кокосового и подсолнечного масел степени защиты близки и составляют соответственно 40 и 44 % в водном растворе и 30 и 31 % в бетоне, что характеризует полученные вещества как ингибиторы средней эффективности. При этом для бетонных образцов получено увеличение времени до начала коррозии в 1.75 раза относительно контрольного состава без добавок.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Lazorenko G., Kasprzhitskii A., Nazdracheva T. Anti-corrosion coatings for protection of steel railway structures exposed to atmospheric environments: A review. *Construction and Building Materials*. 2021;288: 123115. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123115>

2. Montemor M. F., Simoes A. M. P., Ferreira M. G. S. Chloride-induced corrosion on reinforcing steel: from the fundamentals to the monitoring techniques. *Cement and concrete composites*. 2003;25(4-5): 491–502. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00089-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00089-6)

3. Mazgaleva A., Bobylskaya V., Reshetnikov M. Concrete polymer material for the protection of concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures from biological damage. *International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021*. 2021: 1148–1158. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_126

4. Shevtsov, D. S., Zartsyn, I. D., Komarova, E. S., Zhikhareva, D. A., Avetisyan, I. V., Shikhaliev, K. S., Potapov M. A., Kozaderov, O. A. Evaluation of the efficiency of the Master Life CI 222 organic corrosion inhibitor additive for the protection of steel reinforcement bars in concrete. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2022;11(4): 1583–1592. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-4-10>

5. Sastri V. S. *Green corrosion inhibitors: theory and practice*. John Wiley & Sons; 2012. <https://doi.org/10.1002/9781118015438>

6. Alvarez L. X., Troconis de Rincón O., Escribano J., Rincon Troconis B. C. Organic compounds as corrosion inhibitors for reinforced concrete: a review. *Corrosion Reviews*. 2023. <https://doi.org/10.1515/corrrev-2023-0017>

7. Kasatkin, V. E., Dorofeeva, V. N., Kasatkina, I. V., Korosteleva, I. G., Kornienko, L. P. Monitoring the effectiveness of corrosion inhibitors by electrochemical methods. Sodium nitrite as an inhibitor for the protection of steel in a model solution of the concrete pore fluid. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 2023;11(1); 198–220. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-1-11>

8. Das J. K., Pradhan B. Study on influence of nitrite and phosphate based inhibiting admixtures on chloride interaction, rebar corrosion, and microstructure of concrete subjected to different chloride exposures. *Journal of Building Engineering*. 2022;50: 104192. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104192>

9. Abd El Haleem S. M., Abd El Wanees S., Bahgat A. Environmental factors affecting the corrosion behaviour of reinforcing steel. VI. Benzotriazole and its derivatives as corrosion inhibitors of steel. *Corrosion Science*. 2014;87: 321–333. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2014.06.043>

10. Okeniyi J. O., Omotosho O. A., Ajayi O. O., Loto C. A. Effect of potassium-chromate and sodium-nitrite on concrete steel-rebar degradation in sulphate and saline media. *Construction and Building Materials*, 2014;50: 448–456. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.063>

11. Zomorodian A., Behnood A. Review of Corrosion Inhibitors in Reinforced Concrete: Conventional and Green Materials. *Buildings*. 2023;13(5): 1170. <https://doi.org/10.3390/buildings13051170>

12. Naderi R., Bautista A., Velasco F., Soleimani M., Pourfath, M. Green corrosion inhibition for carbon steel reinforcement in chloride-polluted simulated concrete pore solution using *Urtica Dioica* extract. *Journal of Building Engineering*. 2022;58: 105055. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105055>

13. Wang Q., Wu X., Zheng H., Liu L., Zhang Q., Zhang A. Evaluation for *Fatsia japonica* leaves extract (FJLE) as green corrosion inhibitor for carbon steel in simulated concrete pore solutions. *Journal of Building Engineering*. 2023;63: 105568. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105568>

14. Harb M. B., Abubshait S., Eteyeb N., Kamoun M., Dhouib A. Olive leaf extract as a green corrosion inhibitor of reinforced concrete contaminated with seawater. *Arabian Journal of Chemistry*. 2020;13(3): 4846–4856. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.01.016>

15. Subbiah K., Lee H. S., Mandal S., Park, T. Conifer cone (*Pinus resinosa*) as a green corrosion inhibitor for steel rebar in chloride-contaminated synthetic concrete pore solutions. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021;13(36): 43676–43695. <https://doi.org/10.1021/acscami.1c11994>
16. Ramesh T., Chauhan D. S., Quraishi M. A. Coconut Coir Dust Extract (CCDE) as green corrosion inhibitor for rebar steel in concrete environment. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2021;10(2): 618–633. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-2-9>
17. Gromboni M. F., Sales A., de AM Rezende, M., Moretti, J. P., Corradini, P. G., Mascaro, L. H. Impact of agro-industrial waste on steel corrosion susceptibility in media simulating concrete pore solutions. *Journal of Cleaner Production*. 2021;284: 124697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124697>
18. Vaidya N. R., Aklujkar P., Rao A. R. Modification of natural gums for application as corrosion inhibitor: a review. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2022;19(1): 223–239. <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00510-z>
19. Yoo S. H., Kim Y. W., Chung K., Baik S. Y., Kim J. S. Synthesis and corrosion inhibition behavior of imidazoline derivatives based on vegetable oil. *Corrosion Science*. 2012;59: 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.02.011>
20. Topilnytskyy P., Romanchuk V., Yarmola T. Production of corrosion inhibitors for oil refining equipment using natural components. *Chemistry & Chemical Technology*. 2018;12(3): 400–404. <https://doi.org/10.23939/chcht12.03.400>
21. Mohamed A., Visco D. P., Bastidas D. M. Sodium succinate as a corrosion inhibitor for carbon steel rebars in simulated concrete pore solution. *Molecules*. 2022;27(24): 8776. <https://doi.org/10.3390/molecules27248776>
22. Sagoe-Crentsil K. K., Yilmaz V. T., Glasser F. P. Corrosion inhibition of steel in concrete by carboxylic acids. *Cement and Concrete Research*. 1993;23(6): 1380–1388. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90075-k](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90075-k)
23. Tian Y., Guo W., Wang W., Wang B., Zhang P., Zhao T. Influence of organic corrosion inhibitors on steel corrosion in concrete under the coupled action of freeze–thaw cycles and chloride attack. *Construction and Building Materials*. 2023;368: 130385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130385>
24. Mansfeld F. Tafel slopes and corrosion rates obtained in the pre-Tafel region of polarization curves. *Corrosion Science*. 2005;47(12): 3178–3186. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.04.012>
25. Nam N. D., Van Hien P., Hoai N. T., Thu V. T. H. A study on the mixed corrosion inhibitor with a dominant cathodic inhibitor for mild steel in aqueous chloride solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2018;91: 556–569. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.06.007>
26. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*. 2004;37(9): 623–643. <https://doi.org/10.1007/bf02483292>

Информация об авторах

Козадеров Олег Александрович, д. х. н., доцент, заведующий кафедрой физической химии, Воронежский государственный университет, (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-0249-9517>
ok@chem.vsu.ru

Шевцов Дмитрий Сергеевич, н. с. кафедры физической химии, Воронежский государственный университет, (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-4480-787X>
shevtsov@chem.vsu.ru

Потанов Михаил Андреевич, н. с. кафедры физической химии, Воронежский государственный университет, (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1795-7605>
amidines@mail.ru

Зарцын Илья Давидович, д. х. н., профессор кафедры физической химии, Воронежский государственный университет, (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-7161-9754>
zar-vrn@mail.ru

Грушевская Светлана Николаевна, к. х. н., доцент кафедры физической химии, Воронежский государственный университет, (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-7083-1438>
sg@chem.vsu.ru

Кружилин Алексей Александрович, к. х. н., н. с. лаборатории органических добавок для процессов химического и электрохимического осаждения металлов и сплавов, применяемых в электронной промышленности, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-2262-0131>
kruzhilin.alexey@gmail.com

Ильина Евгения Алексеевна, аспирант кафедры физической химии, Воронежский государственный университет, (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0004-4825-5894>
zhenya.ali@yandex.ru

Ткаченко Кирилл Александрович, студент кафедры физической химии, Воронежский государственный университет, (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0002-4971-8921>
bioshinf1912@mail.ru

Шихалиев Хидмет Сафарович, д. х. н., профессор, заведующий кафедрой органической химии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6576-0305>
shikh1961@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.03.2023; одобрена после рецензирования 18.04.2023; принята к публикации 15.05.2023; опубликована онлайн 25.09.2023.