

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 620.193+547.792

Научная специальность ВАК – 1.4.3. Органическая химия; 1.4.4. Физическая химия
<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13320>

Синтез и антикоррозионные свойства 2-алкил-5-метил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиrimидин-7-олов

А. А. Кружилин[✉], Д. С. Шевцов, И. А. Дмитриев, М. А. Потапов, Х. С. Шихалиев

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

Аннотация

Цель статьи: разработка метода синтеза серии 2-алкил-5-метил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиrimидин-7-олов, исследование ингибирующих свойств и закономерностей взаимодействия данных соединений со стальной поверхностью для создания нового поколения эффективных и экологически безопасных ингибиторов кислотной коррозии.

Экспериментальная часть: В статье представлены результаты синтеза и исследования антикоррозионных свойств новых производных 2-алкил-5-метил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиrimидин-7-олов, полученных на основе индивидуальных жирных кислот и растительных масел. Реакция аминотриазолов с кротоновым альдегидом в среде амфотерного ПАВ позволила разработать метод получения целевых соединений с высоким выходом и чистотой. Антикоррозионные свойства синтезированных триазолопиrimидинолов исследованы в отношении стали Ст3 в 24%-ной HCl с использованием прямых (ГОСТ 9.905-82, 9.907-83) и электрохимических (потенциодинамическая поляризация, метод поляризационного сопротивления по Мансфельду) методов. Электрохимические испытания методом потенциодинамической поляризации и прямые коррозионные тесты в 24%-ной HCl показали, что все исследованные соединения проявляют выраженное ингибирующее действие на сталь Ст3.

Выводы: Установлено, что все исследованные соединения являются ингибиторами смешанного типа. Наиболее эффективными оказались производные, полученные на основе кокосового масла, обеспечивающие степень защиты до 98.5 % при концентрациях 1–2 г/л. Сопоставление данных гравиметрии и поляризационных измерений позволило установить, что высокие мгновенные значения степени защиты по данным электрохимических методов соответствуют интенсивной физической адсорбции молекул сразу после внесения ингибитора. При длительной же экспозиции в рамках прямых гравиметрических испытаний наблюдалось снижение степени защиты для соединений с длиной алкильного заместителя C13 и более, что объясняется неполной устойчивостью сформированных плёнок при длительном воздействии кислоты и их частичной десорбцией, что вызывает локализованную коррозию на отдельных участках поверхности и приводит к снижению защитных показателей. Полученные результаты подтверждают перспективность синтеза 4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиrimидин-7-олов на основе растительного сырья для разработки биоразлагаемых и ингибиторов кислотной коррозии на их основе.

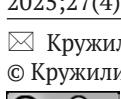
Ключевые слова: коррозия металла, сталь, соляная кислота, ингибиторы коррозии, гетероциклические соединения, растительные масла, аминотриазолы, тетрагидротриазолопиrimидинолы, физико-химические методы исследования

Источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-23-00457, <https://rscf.ru/project/24-23-00457/>).

Для цитирования: Кружилин А. А., Шевцов Д. С., Дмитриев И. А., Потапов М. А., Шихалиев Х. С. Синтез и антикоррозионные свойства 2-алкил-5-метил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиrimидин-7-олов. Конденсированные среды и межфазные границы. 2025;27(4): 630–638. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13320>

 Кружилин Алексей Александрович, e-mail: kruzhilin.alexey@gmail.com

© Кружилин А. А., Шевцов Д. С., Дмитриев И. А., Потапов М. А., Шихалиев Х. С., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

В современных технологиях кислотных обработок нефтяных и газовых скважин широкое применение находят ингибиторные кислоты, обеспечивающие защиту стальных элементов оборудования от интенсивной кислотной коррозии [1–3]. Основу их состава составляют органические соединения, способные к адсорбции на поверхности металла и образованию защитной плёнки, препятствующей прямому контакту кислоты с металлом. Наиболее изученными и используемыми классами соединений являются азот- и серосодержащие ингибиторы, а также композиционные системы на их основе с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ) [4].

Азотсодержащие гетероциклы, такие как бензотриазол и его производные, отличаются высокой эффективностью в соляных кислотах и стабильностью адсорбционного слоя при умеренных температурах. Их преимуществами являются низкая летучесть, совместимость с кислотными растворами и способность к комплексообразованию с ионами железа. Однако с ростом температуры их защитные свойства могут снижаться, что требует модификации структуры молекулы или использования синергетических добавок. Серосодержащие соединения, такие как тиомочевина и некоторые производные бензотриазола, проявляют хорошую активность в более жёстких условиях, но их эффективность часто ограничена нестабильностью в окислительных средах и повышенной чувствительностью к составу пластовых вод.

Наиболее устойчивую защиту обеспечивают комбинированные системы, в которых азот- и серосодержащие соединения дополняются катионными или неионогенными ПАВ. Такие композиции характеризуются высокой адсорбционной способностью и равномерным распределением по поверхности металла, но их многокомпонентность усложняет подбор состава и может снижать экологическую приемлемость. В этой связи особый интерес представляют новые поколения ингибиторов на основе биодеградируемых и возобновляемых источников, которые сочетают эффективность традиционных органических ингибиторов с экологической безопасностью и доступностью исходного сырья, что особенно актуально для современных технологий разработки месторождений, ориентированных на принципы «зелёной химии» [5].

В свете данных представлений одним из перспективных направлений является синтез ин-

гибиторов коррозии на основе растительного сырья, в частности, на основе жирных кислот и растительных масел. Так, ранее авторами было показано [6–7], что производные ряда триазоло-пиримидинов, получаемые на основе растительных масел, проявляют высокую эффективность ингибиции кислотной коррозии стали в 24%-ной HCl. Такие соединения содержат активные центры (атомы N и OH-группы), способные к прочной координации с поверхностью стали и формированию стабильных защитных слоёв.

Другим классом ингибиторов сходного класса являются 2-алкил-5-метил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олы. Разработка метода их синтеза, исследование ингибирующих свойств и закономерностей взаимодействия данных соединений со стальной поверхностью представляет собой важную задачу для создания нового поколения эффективных и экологически безопасных ингибиторов кислотной коррозии.

2. Экспериментальная часть

Спектральные методы анализа

Хроматографический анализ чистоты полученных соединений проводили на жидкостном хроматографе Agilent 1260 Infinity с УФ и масс-детектированием (времяпролётный детектор масс высокого разрешения Agilent 6230 TOF LC/MS, ионизация электрораспылением). Условия хроматографирования: колонка Gemini C18 (4.6×50 мм); диаметр частиц сорбента 5 мкм; линейное градиентное элюирование; подвижная фаза: элюент А – MeCN–H₂O, 2.5 : 97.5, 0.1 % CF₃COOH, элюент В – MeCN, 0.1 % CF₃COOH, скорость потока подвижной фазы 3.75 мл/мин; температура колонки 40 °C; объем инжекции 1.5 мкл.

Общая методика синтеза 3-замещенных 5-амино-1Н-1,2,4-триазолов (1a–c)

К раствору 0.1 моль карбоновой кислоты в 100 мл бутанола порционно добавляли 0.1 моль (13.6 г) аминогуанидиникарбоната. Смесь подогревали до 90–95 °C (наблюдали выделение углекислого газа) и кипятили с насадкой Дина-Старка и обратным холодильником, снабжённым хлоркальциевой трубкой, в течение ~20 часов. По истечении этого времени в реакционную массу вносили 2 г едкого натра и продолжали кипячение в течение еще 5 часов для циклизации образованного интермедиата 1a–c*. Завершение протекания реакции фиксировали по количеств-

ву отделившейся воды в ловушке Дина–Старка (~ 3.5 см³). Смесь охлаждали, полученную смесь триазолов промывали водой и экстрагировали в системе бутанол–вода, удаляя водную фракцию 3 раза, органическую фракцию сушили над сульфатом натрия, после чего упаривали на роторном испарителе.

Общая методика синтеза 3-замещенных 5-амино-1Н-1,2,4-триазолов (1d-f)

К раствору ~ 0.1 моль растительного масла в 100 мл бутанола по каплям добавляли 1 мл серной кислоты, затем порционно добавляли к полученному раствору 0.3 моль (40.8 г) аминогуанидинобикарбоната. Далее процедура соответствовала вышеописанному методу.

Общая методика синтеза производные 2-алкил-5-метил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиридин-7-олов (2a-f)

Смесь 0.1 моль кротонового альдегида и ~ 0.1 моль аминотриазолов 1a-f в среде амфотерного ПАВ (40 мас. % от общей массы реагентов) выдерживали при температуре 80–85 °С в течение 15 минут. Смесь остужали и исследовали без выделения и дальнейшей обработки.

Электрохимические исследования

Полученные производные 2-алкил-5-метил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиридин-7-олов были исследованы на предмет антакоррозионной активности в отношении кислотной коррозии стали Ст3 в 24%-ной HCl гравиметрически в прямых коррозионных испытаниях, а также по методу потенциодинамической поляризации.

Прямые коррозионные испытания проводили в соответствии с ГОСТ 9.905-82 «Методы коррозионных испытаний», 9.907-83 «Методы удаления продуктов после коррозионных испытаний».

Коррозионные испытания проводили на стальных пластинах (20×40 мм, толщина 1.2 мм). Каждый образец предварительно полировали мелкозернистой шлифовальной бумагой K1000, после чего промывали дистиллированной водой, этианолом и сушили фильтровальной бумагой. Эксперименты проводили в 24%-ном растворе HCl (в течение 7 суток) при естественной аэрации без перемешивания для трех образцов одновременно (для каждой концентрации ингибитора). После испытаний пластины промывали дистиллированной водой и обрабатывали составами в соответствии с ГОСТ 9.907-83.

Скорость коррозии определяли по потере массы образцов и рассчитывали по формуле:

$$k_{inh} = \frac{\Delta m}{S \times t},$$

где $\Delta m = m_0 - m$ (m_0 – масса образца до начала эксперимента, m – масса образца после испытаний, г), S – геометрическая площадь поверхности пластиинки, м².

Для каждого раствора определяли скорость коррозии k_0 без добавки ингибитора (k_0 (сред) ≈ 16.9 г/м²·сут). Эффективность ингибирующего действия производных аминотриазина оценивали по величине коэффициента торможения:

$$\gamma = \frac{k_0}{k_{inh}}$$

и степени защиты:

$$Z = \left[\frac{k_0 - k_{inh}}{k_0} \right] \times 100 \%,$$

где k_0 и k_{inh} – скорость коррозии в фоновом растворе и в растворе с ингибитором соответственно.

Расчет скорости коррозии по методу поляризационного сопротивления

Поляризационные кривые получали на электроде из стали марки Ст3 (площадью 1.0 см²) в электрохимической ячейке с неразделенными электродными пространствами на потенциостате IPC-PRO. Рабочий электрод предварительно зачищали на наждачной бумаге K2000 и обезжиривали этиловым спиртом. Потенциалы электрода (E) измеряли относительно хлоридсеребряного электрода, соединяя пространство электрохимической ячейки и электрода сравнения посредством электролитического моста на основе агар-агара и нитрата натрия, и пересчитывали на шкалу стандартного водородного электрода (ст.в.э.) (потенциал + 202 мВ относительно ст.в.э.). Вспомогательный электрод – платиновая сетка.

Исследуемые вещества вводили в кислоту до получения необходимой концентрации. В готовый раствор помещали электроды и выдерживали до наступления стационарного состояния в течение 30 минут. После установления значения потенциала коррозии (E_{cor}) получали поляризационные кривые со скоростью сканирования потенциала 0.2 мВ/с в анодном и катодном направлениях. Поляризационные кривые регистрировали до достижения плотности тока (i) 0.1 А·см⁻².

Скорость коррозии в токовых единицах определяли методом поляризационного сопротивления в соответствии с расчетной процедурой Ф. Мансфельда [8].

Исследования проводили с помощью трехэлектродной ячейки с неразделенным катодным и анодным пространствами без перемешивания в условиях естественной аэрации, электрод сравнения – хлоридсеребряный (потенциал + 202 мВ относительно ст.в.э.), вспомогательный электрод – платиновая сетка. Электрод сравнения отделяли от ячейки электролитическим мостом, изготовленным на основе агар-агара и NaNO_3 .

Рабочий электрод предварительно зачищали на наждачной бумаге P2000, обезжиривали этиловым спиртом (96 %) и промывали дистиллированной водой. В готовый раствор помещали электроды и выдерживали до наступления стационарного состояния в течение 30 минут. Пост достижении стационарного состояния производили поляризацию электрода в интервале ± 30 мВ от значения E_{cor} в потенциодинамическом режиме со скоростью сканирования 0.2 мВ/с.

Поляризационное сопротивление R_p определяли, как наклон поляризационной кривой в точке E_{cor} в координатах $\Delta E - I$, где ΔE – разница текущего потенциала электрода и потенциала коррозии ($E - E_{\text{cor}}$), I – сила электрического тока в измерительной цепи. Далее перестраивали зависимость в координатах $2.3R_p I - \Delta E$. Коэффициенты b_a и b_c (тафелевские наклоны катодного и анодного участков поляризационной кривой) определяли с помощью программы TableCurve 2D как параметры аппроксимации уравнения:

$$2.3R_p I = \frac{b_a b_c}{b_a + b_c} \left[\exp\left(\frac{E - E_{\text{cor}}}{b_a}\right) - \exp\left(-\frac{E - E_{\text{cor}}}{b_c}\right) \right].$$

Ток коррозии рассчитывался с учетом полученных коэффициентов по уравнению:

$$I_{\text{cor}} = \frac{B}{R_p},$$

где B – коэффициент Штерна–Гири, рассчитывается по формуле:

$$B = \frac{b_a b_c}{2.3(b_a + b_c)}$$

Для возможности сравнения данных, получаемых в различных исследованиях, далее будут представлены значения плотности тока коррозии (i_{cor}), рассчитываемые по выражению:

$$i_{\text{cor}} = \frac{I_{\text{cor}}}{S},$$

где S – геометрическая площадь электрода. Для удобства дальнейшего сравнения полученных данных рассчитывали отношение плотности тока коррозии каждого исследованного образца к плотности тока фонового эксперимента ($i_{\text{cor}}^0 \approx 6.8 \text{ mA/cm}^2$):

$$Z_i = \frac{i_{\text{cor}}}{i_{\text{cor}}^0} \times 100 \text{ \%}.$$

Измерения для каждой концентрации вещества производили не менее 5 раз до получения воспроизводимых данных с их последующей статистической обработкой результатов измерения.

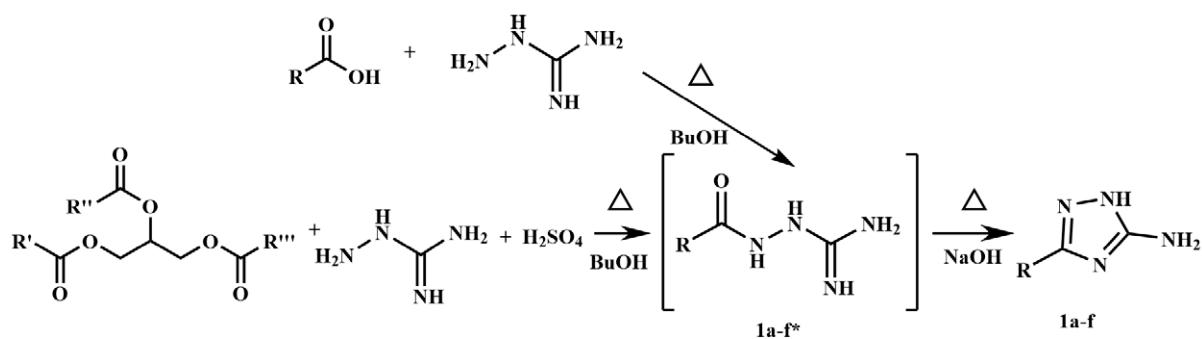
3. Результаты и обсуждение

1,2,4-аминотриазолы **1a–c** на основе индивидуальных жирных кислот (каприновая, миристиновая, стеариновая), а также смеси 1,2,4-аминотриазолов **1d–f** на основе растительных масел (кокосового, пальмового и подсолнечного) были получены реакцией бикарбоната аминогуанидина с жирной кислотой либо маслом по ранее описанной методике [6] (рис. 1).

Состав смесей аминотриазолов **1a–f** был установлен по методу ВЭЖХ/МС и составил $> 95 \text{ \%}$.

Полученные таким образом 3-алкил-1Н-5-амино-1,2,4-аминотриазолы вводили в дальнейшее превращение с кротоновым альдегидом по уже известной методике [7]. Для этого смесь 0.1 моль кротонового альдегида и ~ 0.1 моль смеси аминотриазолов **1a–f** в среде амфотерного ПАВ выдерживали при температуре 80–85 °C в течение 15 минут. В рамках данного взаимодействия 1,2,4-триазолы претерпевают превращение, заключающее на первой стадии в присоединении к кратной связи экзоциклической аминогруппы по механизму Михаэля, и на второй стадии – во внутримолекулярной циклизации с нуклеофильным присоединением по карбонильной группе. В результате образуются производные 2-алкил-5-метил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиримидин-7-олов **2a–f** (рис. 2).

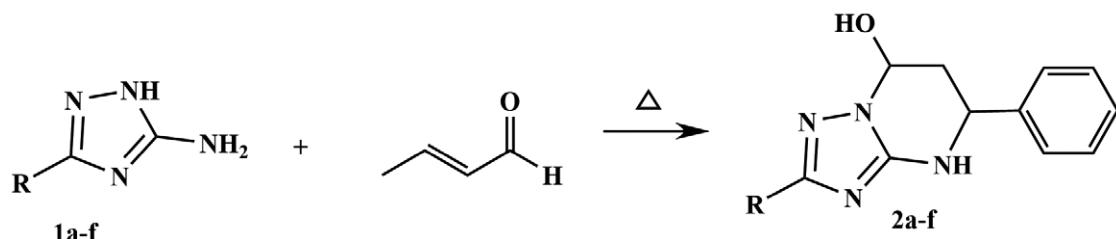
Результаты прямых коррозионных испытаний в 24%-ной HCl (табл. 1) показали, что все соединения **2a–f** снижают скорость коррозии стали Ст3 по сравнению с фоновым раствором. Наиболее выраженное ингибирующее действие проявляют производные, полученные из **кокосового масла 2d** – степень защиты Z достигает



R: C_9H_{19} (a), $\text{C}_{13}\text{H}_{27}$ (b), $\text{C}_{17}\text{H}_{35}$ (c),

R', R'', R''' : остатки жирных кислот кокосового (d), пальмового (e), подсолнечного (f) масла

Рис. 1. Схема синтеза 3-алкил-1H-5-амино-1,2,4-триазолов



R: C_9H_{19} (a), $\text{C}_{13}\text{H}_{27}$ (b), $\text{C}_{17}\text{H}_{35}$ (c),

остатки жирных кислот кокосового (d), пальмового (e), подсолнечного (f) масла

Рис. 2. Реакция 3-алкил-1H-5-амино-1,2,4-триазолов с кротоновым альдегидом

Таблица 1. Показатели антакоррозионной активности по результатам прямых коррозионных тестов в 24%-ной HCl

Ингибитор	$\text{C}_{\text{ингр.}}$ $\text{Г}\cdot\text{ДМ}^{-3}$	Скорость коррозии. $k_{\text{inh.}}$ $\text{г}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$	Коэффициент торможения. γ . %	Степень защиты. Z. %
без ингибитора	–	16.90	–	–
2a	1	1.02	9.60	94.05
	2	0.85	11.50	95.03
2b	1	4.46	2.18	73.84
	2	4.32	2.26	74.72
2c	1	7.29	1.34	57.31
	2	4.98	1.96	70.84
2d	1	0.32	30.23	98.11
	2	0.25	38.41	98.51
2e	1	5.25	3.25	69.24
	2	1.92	8.90	88.77
2f	1	10.19	1.67	40.28
	2	9.93	1.72	41.85

98.1–98.5 % при концентрации 1–2 г/л, это соответствует коэффициенту торможения $\gamma \approx 30$ –38, что значительно превышает значения для других аналогов. При этом результат, полученный для производного 2a, полученного на ос-

нове индивидуальной карбоновой кислоты (ка-приновой кислоты), составляет 94.0–95.0 %. Такая длина гидрофобного алкильного заместителя коррелирует с средним жирнокислым составом кокосового масла, в котором производные

с заместителями C7–C13 являются мажорными. Схожая взаимосвязь структуры ингибитора и защитных характеристик наблюдается и для прочих исследованных триазолопиrimидинолов: с ростом длины заместителя выше 9–10 атомов углерода наблюдается существенное снижение защитных характеристик ингибитора. Такая зависимость согласуется с известным влиянием длины углеводородной цепи на поверхностную активность и адсорбционную способность молекулы на границе металл–кислота: при избыточном удлинении цепи снижается растворимость и, как следствие, плотность упаковки слоя ингибитора на поверхности стали.

По данным поляризационных испытаний производных **2a–c** получен набор анодных и катодных поляризационных кривых (рис. 3). Электрохимические измерения методом потенциодинамической поляризации (табл. 2) подтвердили высокую ингибирующую активность всех исследованных соединений. Добавление всех исследованных ингибиторов вызывало смещение потенциала коррозии (E_{cor}) в катодную область (на 90–120 мВ относительно фона), включающем подавление как анодных, так и катодных реакций, что свидетельствует о смешанном механизме ингибиции. При этом форма анодных и катодных ветвей поляризационных кривых сохраняется, но плотность тока существенно снижается, что указывает на блокирование активных центров коррозии без изменения механизма реакции растворения железа.

Значения поляризационного сопротивления R_p возрастили в десятки и сотни раз (до

1124 к Ω ·см 2 для **2d** при 2 г/л), что сопровождается снижением плотности коррозионного тока i_{cor} до 0.021–0.055 мА·см $^{-2}$. Для сравнения, без ингибитора $i_{cor} \approx 6.8$ мА·см $^{-2}$. Степень защиты по данным электрохимических методов (Z_i) составила 94–98 %, при этом. Высокая ингибирующая активность исследованных соединений, вероятно, обусловлена их многоцентровым характером адсорбции. Молекулы содержат несколько донорно-акцепторных центров (атом азота пиримидинового цикла, гидроксильная группа), способных к комплексообразованию с ионами железа. Вероятно, это приводит к образованию хелато-подобных поверхностных комплексов, которые формируют плотный защитный слой, препятствующий доступу H $^+$ и Cl $^-$ к поверхности металла. Характер адсорбции, судя по высокой степени защиты и зависимости эффективности от концентрации, соответствует изотерме Лэнгмюра, что предполагает мономолекулярное покрытие поверхности.

Несмотря на высокие значения степени защиты, рассчитанные по результатам потенциодинамической поляризации и поляризационного сопротивления ($Z_i > 90$ %), для некоторых образцов (**2b–2c** и **2e–2f**) по результатам гравиметрических испытаний получены заметно пониженные значения Z . Такое расхождение обусловлено принципиальными различиями в природе и временных масштабах используемых методов. Электрохимические измерения оценивают мгновенный эффект адсорбции и подавление электрохимических токов в первые десятки минут после введения ингибитора; они чувст-

Таблица 2. Данные электрохимических испытаний смесей 2-алкил-5-метил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-*a*]пиримидин-7-олов **2a–f**

Ингибитор	$C_{инг}$, г·дм $^{-3}$	E_{cor} , мВ	R_p , к Ω ·см 2	i_{cor} , мА·см $^{-2}$	Z_i , %
без ингибитора	–	–188	4.2±0.5	6.8±0.3	–
2a	1.0	–297	574±18	0.054±0.014	94.0
	2.0	–301	487±25	0.077±0.011	92.3
2b	1.0	–293	715±11	0.046±0.003	95.4
	2.0	–303	692±19	0.0046±0.004	95.4
2c	1.0	–291	523±21	0.060±0.014	94.0
	2.0	–291	637±19	0.048±0.004	95.2
2d	1.0	–293	262±14	0.10±0.03	90.3
	2.0	–301	1124±42	0.034±0.013	96.6
2e	1.0	–293	865±19	0.040±0.008	96.0
	2.0	–310	1080±48	0.021±0.005	97.9
2f	1.0	–301	827±22	0.037±0.008	96.3
	2.0	–306	640±14	0.055±0.009	94.5

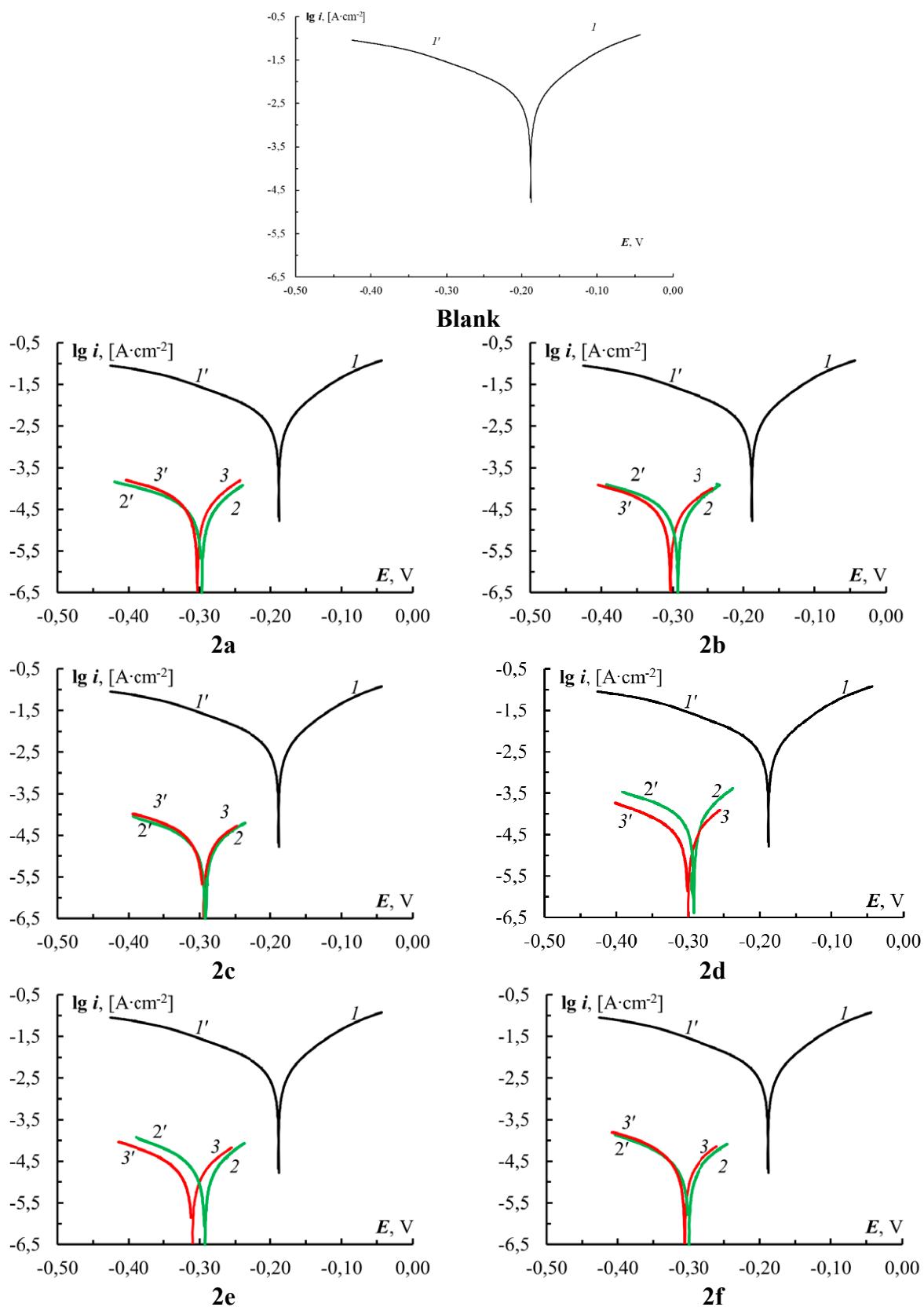


Рис. 3. Анодные (1–3) и катодные (1'–3') поляризационные кривые электродов из стали СТ3 в растворе 24%-ной HCl без добавок ингибиторов (blank), с добавками **2a–2f** в концентрациях 1 г/л (2–2') и 2 г/л (3–3')

вительны к быстрому блокированию активных центров и дают локальную карту эффективности на небольшой площади электрода. Гравиметрия же отражает интегральную потерю массы при длительной (7 суток) экспозиции и фиксирует все последующие процессы – перестройку или деградацию адсорбционного слоя, вымывание ингибитора, взаимодействие с продуктами коррозии и развитие локальных очагов коррозии.

4. Выводы

Разработан метод синтеза новых производных 2-алкил-5-метил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиrimидин-7-олов из аминотриазолов и кротонового альдегида в среде амфотерного ПАВ, позволяющий получать продукты с высокой степенью чистоты (> 95 %) без дополнительной очистки. Гравиметрические испытания в 24%-ной HCl показали, что все исследованные соединения снижают скорость коррозии стали Ст3 при концентрациях ингибитора 1–2 г/л. Наибольшая эффективность достигнута для соединения **2d**, полученного из кокосового масла, степень защиты составила 98.5 %. По данным потенциодинамической поляризации все ингибиторы относятся к соединениям смешанного типа действия, влияющим как на анодные, так и на катодные процессы. При этом значения R_p возрастают в десятки раз (до 1124 $\text{k}\Omega\cdot\text{см}^2$), а плотность коррозионного тока i_{cor} снижается более чем на два порядка, что соответствует степеням защиты 94–98 %. Для образцов **2b-2c** и **2e-2f** наблюдается расхождение между электрохимическими и гравиметрическими данными: высокая мгновенная эффективность ($Z_i > 90 \%$) не сопровождается долговременной стабильностью покрытия. Это объясняется частичной десорбцией и вымыванием адсорбционного слоя ингибитора при длительной экспозиции металла в соляной кислоте. Показано, что эффективность ингибиторов определяется оптимальной длиной алкильного радикала (C_9-C_{10}): при чрезмерном удлинении цепи снижается растворимость соединения и однородность покрытия, что ухудшает защитные свойства. Полученные результаты демонстрируют высокую перспективность производных 4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиrimидин-7-олов, синтезированных в том числе из растительных масел, в качестве экологи-

чески безопасных и эффективных ингибиторов кислотной коррозии стали для нефтегазовой и химической промышленности.

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. Fredd C. N., Fogler H. S. Alternative stimulation fluids and their impact on carbonate acidizing. *SPE Journal*. 1998;3(1): 34–41. <https://doi.org/10.2118/31074-PA>
2. Iqbal M. I., Kudapa V. K. *Oil well production mechanism*. New York: River Publishers; 2025. 484 p. <https://doi.org/10.1201/9781003605706>
3. Al-Moubaraki A. H., Obot I. B. Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2021;25(12): 101370. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101370>
4. Авдеев Я. Г., Кузнецов Ю. И. Физико-химические аспекты ингибиции кислотной коррозии металлов ненасыщенными органическими соединениями. *Успехи химии*. 2012; 81(12): 1133–1145. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18226908>
5. Swathi P. N., Rasheeda K., Samshuddin S., Alva V. D. Fatty acids and its derivatives as corrosion inhibitors for mild steel—an overview. *Journal of Asian Scientific Research*. 2017;7(8): 301–308. <https://doi.org/10.18488/journal.2.2017.78.301.308>
6. Кружилин А. А., Шевцов Д. С., Дмитриев И. А., Потапов М. А., Шихалиев Х. С. Синтез производных 2-алкил-5-фенил-4,5,6,7-тетрагидро-[1,2,4]триазоло[1,5-а]пиrimидин-7-олов из растительных масел и их эффективность как ингибиторов солянокислотной коррозии стали. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2025;27(3): 409–416. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13017>
7. Kruzhilin A. A., Shevtsov D. S., Potapov A. Yu., ... Kasatkin V. E. Novel inhibitory compositions based on 4,5,6,7-tetrahydro-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidin-7-ol derivatives for steel acid corrosion protection. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*. 2022;11(2): 774–795. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-2-22>
8. 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>

Информация об авторах

Кружилин Алексей Александрович, к. х. н., заведующий лабораторией 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

Шевцов Дмитрий Сергеевич, 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/0000-0003-4480-787X>
shevtsov@chem.vsu.ru

Дмитриев Иван Александрович, студент кафедры органической химии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

Потапов Михаил Андреевич, к. х. н., ведущий инженер-химик кафедры биохимии и физиологии клетки медико-биологического факультета, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1795-7605>
amidines@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>
chocd261@chem.vsu.ru

Поступила в редакцию 28.02.2025; одобрена после рецензирования 10.09.2025; принята к публикации 15.10.2025; опубликована онлайн 25.12.2025.