

# Конденсированные среды и межфазные границы

<https://journals.vsu.ru/kcmf/>

## 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]пиримидин-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]пиримидин-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]пиримидин-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 триазолопиримидинов 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 Мансфелду) 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]пиримидин-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, тетрагидротриазолопиримидинолы, 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]пиримидин-7-олов. Конденсированные среды и межфазные границы. 2025;27(4): 630–638. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13320>

**For citation:** Kruzhillin A. A., Shevtsov D. S., Dmitriev I. A., Potapov M. A., Shikhaliev Kh. S. Synthesis and anticorrosive properties of 2-alkyl-5-methyl-4,5,6,7-tetrahydro-[1,2,4]triazolo[1,5-a]pyrimidin-7-ols. Condensed Matter and Interphases. 2025;27(4): 630–638. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/13320>

✉ Кружилин Алексей Александрович, e-mail: [kruzhillin.alexey@gmail.com](mailto:kruzhillin.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 работ нефтяных и газовых скважин широкое применение находят ингибированные 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 бензотиазола, 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 биodeградируемых 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 триазолопиримидинов, получаемые на основе растительных масел, проявляют высокую эффективность ингибирования 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–H<sub>2</sub>O, 2.5 : 97.5, 0.1 % CF<sub>3</sub>COOH, элюент В – MeCN, 0.1 % CF<sub>3</sub>COOH, скорость потока подвижной фазы 3.75 мл/мин; температура колонки 40 °C; объем инъекции 1.5 мкл.

### *Общая методика синтеза 3-замещенных 5-амино-1H-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) амингуанидинбикарбоната. Смесь подогревали до 90–95 °C (наблюдали выделение углекислого газа) и кипятили с насадкой Дина-Старка и обратным холодильником, снабженным 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 количест-

ву отделившейся воды в ловушке Дина–Старка (~ 3.5 см<sup>3</sup>). 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 ротонном 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) аминогуанидинбикарбоната. 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]пиримидин-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]пиримидин-7-олов были исследованы на предмет антикоррозионной 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, этанолом 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 пластинки, м<sup>2</sup>.

Для каждого раствора определяли скорость коррозии  $k_0$  без добавки ингибитора ( $k_0(\text{сред}) \approx 16.9$  г/м<sup>2</sup>·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 см<sup>2</sup>) 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 хлорид-серебряного 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<sup>-2</sup>.



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

Исследования проводили с помощью трех-электродной 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  $\text{NaNO}_3$ .

Рабочий электрод предварительно зачищали на наждачной бумаге Р2000, обезжиривали этиловым спиртом (96 %) и промывали дистиллированной водой. В готовый раствор помещали электроды и выдерживали до наступления стационарного состояния в течение 30 минут. По достижении стационарного состояния производили поляризацию электрода в интервале  $\pm 30$  мВ от значения  $E_{\text{cor}}$  в потенциодинамическом режиме со скоростью сканирования 0.2 мВ/с.

Поляризационное сопротивление  $R_p$  определяли, как наклон поляризационной кривой в точке  $E_{\text{cor}}$  в координатах  $\Delta E - I$ , где  $\Delta E$  – 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 ( $i_{\text{cor}}$ ), 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 ( $i_{\text{cor}}^0 \approx 6.8 \text{ мА/см}^2$ ):

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

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, мирис-тиновая, стеариновая), а также смеси 1,2,4-аминотриазолов **1d-f** на основе растительных масел (кокосового, пальмового и подсолнечного) были получены реакцией бикарбоната аминоганидина 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 %.

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 °С в течение 15 минут. В рамках данного взаимодействия 1,2,4-триазолы претерпевают превращение, заключающееся 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

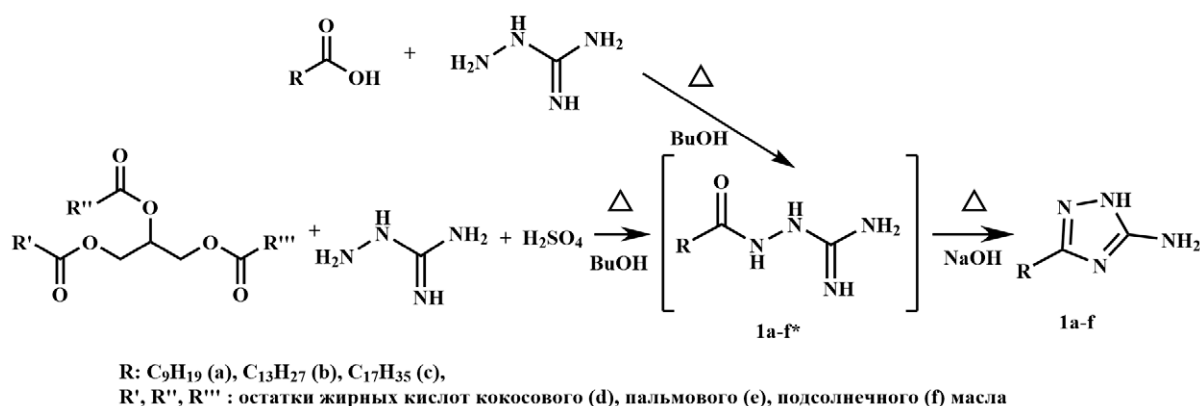


Рис. 1. Схема синтеза 3-алкил-1H-5-амино-1,2,4-триазолов

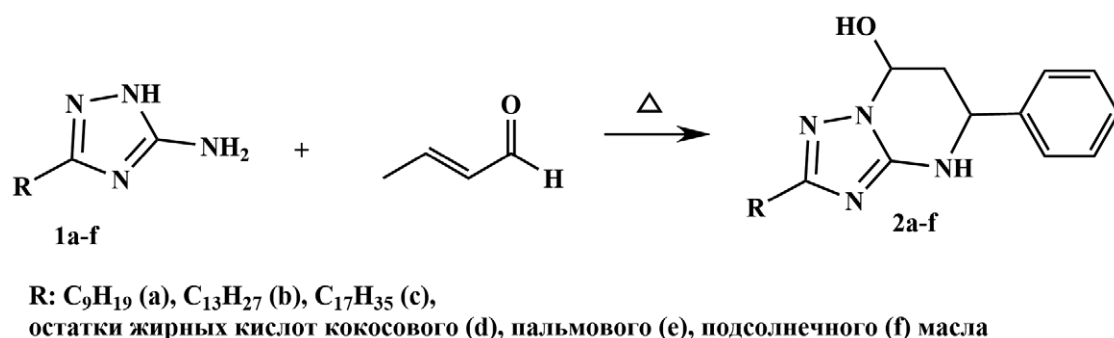


Рис. 2. Реакция 3-алкил-1H-5-амино-1,2,4-триазолов с кротоновым альдегидом

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

| Ингибитор      | $C_{инг}, \text{г} \cdot \text{дм}^{-3}$ | Скорость коррозии.<br>$k_{inh}, \text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ | Коэффициент тормо-<br>жения. $\gamma, \%$ | 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 (каприновой 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 триазолопиримидинов: 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 ( $E_{\text{cor}}$ ) в катодную область (на 90–120 мВ относительно фона), включающем подавление как анодных, так и катодных реакций, что свидетельствует о смешанном механизме ингибирования. 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.

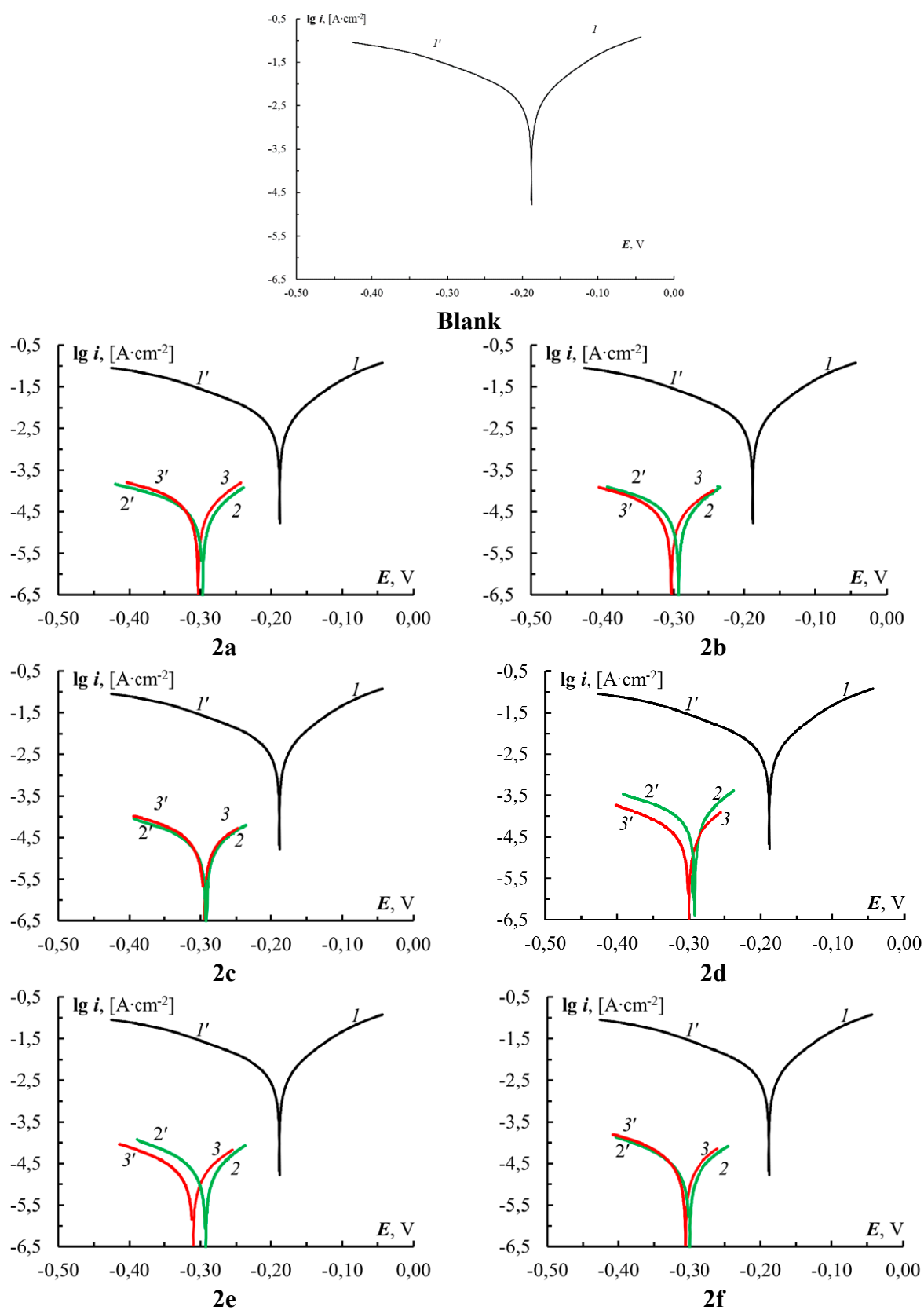
Значения поляризационного сопротивления  $R_p$  возрастали в десятки и сотни раз (до

1124 кΩ·см<sup>2</sup> для **2d** при 2 г/л), что сопровождается снижением плотности коррозионного тока  $i_{\text{cor}}$  до 0.021–0.055 мА·см<sup>-2</sup>. Для сравнения, без ингибитора  $i_{\text{cor}} \approx 6.8$  мА·см<sup>-2</sup>. 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<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> 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-а]пиримидин-7-олов **2a–f**

| Ингибитор      | $C_{\text{инг}}$ , г·дм <sup>-3</sup> | $E_{\text{cor}}$ , мВ | $R_p$ , кΩ·см <sup>2</sup> | $i_{\text{cor}}$ , мА·см <sup>-2</sup> | $Z_i$ , % |
|----------------|---------------------------------------|-----------------------|----------------------------|--|-----------|
| без ингибитора | –                                     | –188                  | 4.2±0.5                    | 6.8±0.3                                | –         |
| <b>2a</b>      | 1.0                                   | –297                  | 574±18                     | 0.054±0.014                            | 94.0      |
|                | 2.0                                   | –301                  | 487±25                     | 0.077±0.011                            | 92.3      |
| <b>2b</b>      | 1.0                                   | –293                  | 715±11                     | 0.046±0.003                            | 95.4      |
|                | 2.0                                   | –303                  | 692±19                     | 0.0046±0.004                           | 95.4      |
| <b>2c</b>      | 1.0                                   | –291                  | 523±21                     | 0.060±0.014                            | 94.0      |
|                | 2.0                                   | –291                  | 637±19                     | 0.048±0.004                            | 95.2      |
| <b>2d</b>      | 1.0                                   | –293                  | 262±14                     | 0.10±0.03                              | 90.3      |
|                | 2.0                                   | –301                  | 1124±42                    | 0.034±0.013                            | 96.6      |
| <b>2e</b>      | 1.0                                   | –293                  | 865±19                     | 0.040±0.008                            | 96.0      |
|                | 2.0                                   | –310                  | 1080±48                    | 0.021±0.005                            | 97.9      |
| <b>2f</b>      | 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 СТЗ 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]пиримидин-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 кΩ·см<sup>2</sup>), 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<sub>9</sub>–C<sub>10</sub>): 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]пиримидин-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 ингибирования 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]пиримидин-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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto: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.*