

## НОВЫЕ ПРОПАРГИЛСОДЕРЖАЩИЕ ПРОИЗВОДНЫЕ ФОСФОРИСТОЙ И ФОСФОНОВОЙ КИСЛОТ — ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИНГИБИТОРЫ КИСЛОТНОЙ КОРРОЗИИ СТАЛЕЙ ДЛЯ НЕФТЕДОБЫЧИ

© М. И. Шатинова<sup>1</sup>, Я. Г. Авдеев<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Институт полимерных материалов НАН Азербайджана, AZ5004, Азербайджанская республика, г. Сумгаит, ул. С. Вургуня, д. 124

<sup>2</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, 119071, г. Москва, Ленинский пр., д. 31, к. 4

\* E-mail: avdeevavdeev@mail.ru

Поступила в Редакцию 9 апреля 2019 г.

После доработки 11 марта 2020 г.

Принята к публикации 13 апреля 2020 г.

*На основе эфиров пропаргилового спирта синтезированы новые производные фосфористой и фосфоновой кислот ацетиленового ряда различного строения (10 соединений). Полученные вещества (6 соединений) существенно тормозят коррозию низкоуглеродистой стали 08кп в 5 М НСl (T = 20–60°C). Защитный эффект этих ингибиторов усиливается с увеличением их содержания в растворе и при повышении температуры. Наиболее сильное замедление коррозии стали обеспечивают эфиры фосфоновой кислоты, содержащие в своем составе спиртовую группу. Для синтезированных ингибиторов коррозии предполагается адсорбционно-полимеризационный механизм действия, в пользу которого свидетельствует усиление защитного эффекта этих соединений с ростом температуры.*

Ключевые слова: *коррозия; ингибиторы коррозии; низкоуглеродистая сталь; ацетиленовые соединения; фосфорорганические соединения*

DOI: 10.31857/S0044461820080058

В нефтегазовой промышленности одним из видов повышения продуктивности скважин, эксплуатирующих карбонатные коллекторы, является кислотная обработка [1]. Ввиду высокой коррозионной агрессивности растворы соляной кислоты, применяемые при проведении этой технологической операции, не используют без ингибиторов коррозии, в качестве которых чаще всего выступают N- и S-содержащие органические соединения [2]. Существенным недостатком этих веществ является утрата ими защитных свойств в случае нагрева растворов кислот выше 80°C, что не всегда удовлетворяет требованиям солянокислотной обработки, в ходе которой темпе-

ратура рабочего раствора может быть существенно выше 100°C. Уникальными ингибиторами кислотной коррозии являются ацетиленовые соединения, многие из которых в индивидуальном состоянии или в форме композиций с соединениями других классов способны защищать стальные конструкции при температурах более 100°C. Наблюдаемый эффект во многом определяется высокой реакционной способностью производных ацетилена, которые, адсорбируясь на поверхности корродирующего металла из раствора кислоты, формируют на ней защитный слой из продуктов полимеризации, который способен эффективно защищать сталь даже в условиях

высокотемпературной коррозии (выше 100°C) [3]. Несмотря на большое число работ, см., например, [4–7], посвященных изучению ингибирующего действия производных ацетилена, сведений об исследовании их фосфорорганических соединений в литературе за последнее время нами не обнаружено.

Цель работы — синтез и изучение свойств новых фосфорорганических эфиров пропаргилового ряда.

### Экспериментальная часть

*Синтез исследуемых соединений.* ИК-спектры синтезированных соединений регистрировали на ИК-Фурье-спектрофотометре ALPHA FTIR (фирма Bruker, Германия) на кристалле ZnSe в диапазоне волновых чисел 600–4000 см<sup>-1</sup>, спектры ЯМР <sup>1</sup>H — на спектрометре Bruker FT-300 (300.13 МГц). Химические сдвиги определены относительно тетраметилсилана ( $\delta = 0.00$  м. д.), в качестве растворителя использован CDCl<sub>3</sub>.

В работе использовали 2-(проп-2-ин-1-илокси)-этан-1-ол (Merck, 98%), 1-хлор-3-(проп-2-ин-1-илокси)пропан-2-ол (Merck, 95%), 1-хлор-3-(проп-2-ин-1-илоксиэтокси)пропан-2-ол (Merck, 95%), эфират трифторида бора (Alfa Aesar, 46.5%), тиомочевину (РЕАХИМ, х.ч.). Трихлорид фосфора (Acros Organics, 99%), триметилфосфит (Alfa Aesar, 97%), диэтиламин (Acros Organics, 98%), метиловый спирт (Alfa Aesar, 99%), эпихлоргидрин (Acros Organics, 99%) перед использованием перегоняли и определяли их физико-химические константы, которые совпадают с литературными данными. В качестве растворителей были использованы бензол (Alfa Aesar, 99%), пиридин (Panreac, 99%) и диэтиловый эфир (Acros Organics, 99%), очищенные перегонкой.

*2-(Проп-2-ин-1-илокси)-1-дихлорфосфит (I).* В круглодонную колбу, снабженную мешалкой, помещали 6.9 г (0.05 моль) свежеперегнанного треххлористого фосфора, а затем при перемешивании и тщательном охлаждении по каплям прибавляли 5.0 г (0.05 моль) 2-(проп-2-ин-1-илокси)этан-1-ола. Реакция сопровождалась бурным выделением хлористого водорода. Затем колбу нагревали на водяной бане 5 ч при одновременном пропуске сухого азота. На следующий день содержимое колбы отделяли от осадка и перегонкой в вакууме выделяли вещество (I) с  $T_{\text{кип}} 74\text{--}75^\circ\text{C}$  (6 мм рт. ст.),  $n_D^{20} 1.5094$ ,  $n_4^{20} 1.3120$ , выход 80.2%.

Аналогично из 1-хлор-3-(проп-2-ин-1-илокси)пропан-2-ола синтезирован *1-хлор-3-(проп-2-ин-1-илокси)-2-дихлорфосфит (II)* с  $T_{\text{кип}} 72\text{--}73^\circ\text{C}$  (1.5 мм рт. ст.),  $n_D^{20} 1.5180$ ,  $n_4^{20} 1.3752$ , выход 70.6%.

*2-(Проп-2-ин-1-илокси)-1-диметилфосфит (III).* В реакционную колбу загружали 6.4 г (0.032 моль) соединения (I) в 40 мл сухого бензола и при постепенном перемешивании прибавляли к смеси 2 г (0.064 моль) метилового спирта и 5.1 г (0.064 моль) пиридина в 50 мл бензола. Температуру реакционной смеси поддерживали на уровне от –1 до +1°C. Затем прибавляли еще 40 мл бензола и перемешивали еще 1–2 ч. На следующий день осадок солянокислого пиридина отфильтровывали, отгоняли растворитель и фракционированием остатка в вакууме выделяли соединение (III) с  $T_{\text{кип}} 77\text{--}78^\circ\text{C}$  (4 мм рт. ст.),  $n_D^{20} 1.4691$ ,  $n_4^{20} 1.1271$ , выход 79.7%.

Аналогично из дихлорангидрида (II) получен *1-хлор-3-(проп-2-ин-1-илокси)-2-диметилфосфит (IV)* с  $T_{\text{кип}} 75\text{--}76^\circ\text{C}$  (1 мм рт. ст.),  $n_D^{20} 1.4996$ ,  $n_4^{20} 1.1902$ , выход 74.7%.

*2-Гидрокси-3-(проп-2-ин-1-илокси)-1-диметилфосфинат (V).* В реакционную колбу с обратным холодильником, соединенным через форштос с ловушкой для хлористого метила, загружали 9.2 г (0.075 моль) триметилфосфита и 11.8 г (0.075 моль) 1-хлор-3-(проп-2-ин-1-илокси)пропан-2-ола, смесь нагревали при температуре 76–78°C в течение 5–6 ч. При этом ловушку погружали в лед с солью. Окончание реакции определялось прекращением выделения хлористого метила. Затем содержимое колбы подвергали вакуумной разгонке и выделяли соединение (V) с  $T_{\text{кип}} 151\text{--}152^\circ\text{C}$  (1 мм рт. ст.),  $n_D^{20} 1.4840$ ,  $n_4^{20} 1.1362$ , выход 66.8%.

Аналогично из 1-хлор-3-(проп-2-ин-1-илокси)пропан-2-ола получен *2-гидрокси-3-(проп-2-ин-1-илоксиэтокси)-1-диметилфосфинат (VI)* с  $T_{\text{кип}} 156\text{--}157^\circ\text{C}$  (1 мм рт. ст.),  $n_D^{20} 1.4973$ ,  $n_4^{20} 1.1621$ , выход 64.4%.

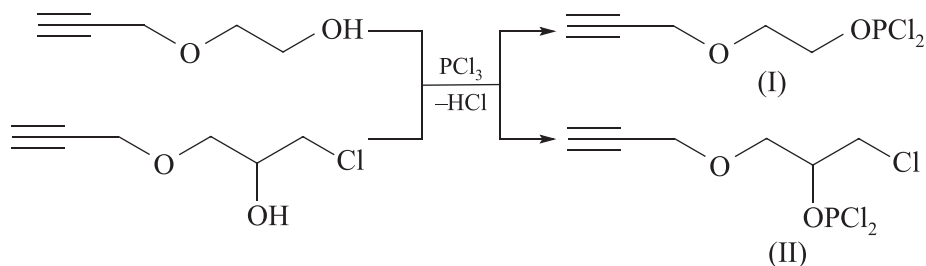
*2-(2-Гидрокси-3-хлорпропилокси)-3-(проп-2-ин-1-илокси)-1-диметилфосфинат (VII).* К смеси 22.2 г (0.1 моль) 2-гидрокси-4,7-диокса-9-децинил-1-диметилфосфината (V) и 0.1 мл эфирата трехфтористого бора при перемешивании и охлаждении (0–5°C) прибавляли 4 г (0.043 моль) эпихлоргидрина. Реакционную смесь перемешивали 4 ч при 25°C. Перегонкой в вакууме выделили вещество (VII) с  $T_{\text{кип}} 182\text{--}183^\circ\text{C}$  (1 мм рт. ст.),  $n_D^{20} 1.5072$ ,  $n_4^{20} 1.2088$ , выход 70.5%.

*2-(2,3-Эпоксипропилокси)-3-(проп-2-ин-1-илокси)-1-диметилфосфинат (VIII).* К 15.7 г (0.05 моль) раствора соединений (VII) в 60 мл диэтилового эфира при перемешивании и охлаждении (5–8°C) добавляли 8.4 г (0.15 моль) порошкообразного едкого калия. Реакционную массу перемешивали еще 2 ч при 12–14°C. После обычной обработки и отгонки рас-

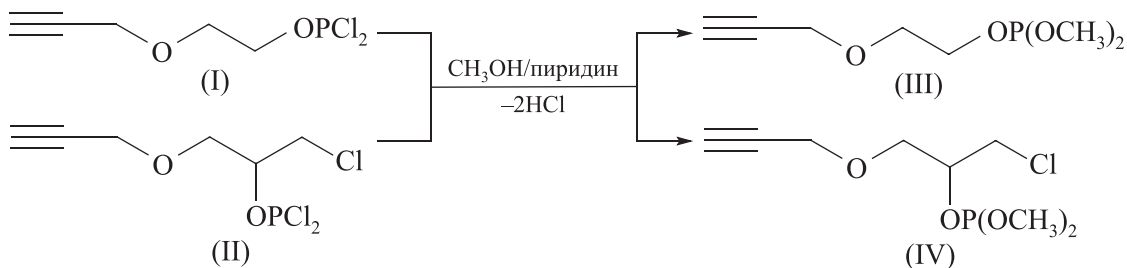
творителя перегонкой в вакууме выделили вещество (VIII) с  $T_{\text{кип}}$  162–163°C (1 мм рт. ст.),  $n_D^{20}$  1.5047,  $n_4^{20}$  1.1833, выход 81.4%.

2-(2-Гидрокси-3-диэтиламинопропилокси)-3-(проп-2-ин-1-илокси)-1-диметилфосфинат (IX). Смесь 3.3 г (0.012 моль) соединения (VIII) и 2.6 г (0.036 моль) диэтиламина перемешивали в присутствии 2 мл воды в течение 10 ч при 50°C, затем экстрагировали эфиром и сушили поташом. После отгонки эфира вакуумной разгонкой выделили (IX) с  $T_{\text{кип}}$  190–191°C (1 мм рт. ст.),  $n_D^{20}$  1.5460,  $n_4^{20}$  1.2078, выход 85.0%.

2-(2,3-Эпителипропилокси)-3-(проп-2-ин-1-илокси)-1-диметилфосфинат (X). 5.6 г (0.02 моль) соединения (VIII) и 1.8 г (0.03 моль) тиомочевины в 60 мл метанола перемешивали в течение 33 ч при 60°C. Затем обработали водой, экстрагировали эфиром и сушили над  $\text{MgSO}_4$ . После отгонки растворителя остаток перегоняли в вакууме и выделили тиран (X) с  $T_{\text{кип}}$  169–170°C (1 мм рт. ст.),  $n_D^{20}$  1.5070,  $n_4^{20}$  1.1574, выход 82.6%.



Синтезированные ди- и трихлорфосфиты (I), (II), содержащие в своем составе пропаргильный фрагмент, легко вступают в реакции с метиловым спиртом



Строение полученных алкоксифосфитов (III), (IV) подтверждено данными ИК- и ЯМР  $^1\text{H}$  спектров. В ИК-спектрах соединений (III), (IV) исчезают полосы поглощения при 730  $\text{см}^{-1}$ , характерные для P–Cl-связи, и появляются полосы поглощения в области 1020–1050 и 1130–1190  $\text{см}^{-1}$ , характерные для группы P–O–C. Наблюдаются также полосы поглощения при 2130 и 3300  $\text{см}^{-1}$ , характерные для тер-

**Коррозионные исследования.** Скорость коррозии стали 08кп (состав, мас%: 0.05–0.11 C, до 0.03 Si, 0.25–0.5 Mn, до 0.25 Ni, до 0.04 S, до 0.035 P, до 0.1 Cr, до 0.25 Cu, до 0.08 As, остальное Fe) в 5 М HCl при температуре 20–60°C определяли по потере массы образцов размером 30 мм × 20 мм × 1.0 мм. Перед опытом образцы зачищали шлифовальной машиной, обезжиривали ацетоном и оставляли в эксикаторе на 24 ч. Содержание исследованных ингибиторов в растворе составляет 0.5–1.0 г·л $^{-1}$ .

Эффективность ингибиторов оценивали по величинам коэффициента торможения  $\gamma = k_0/k_{\text{ин}}$ , где  $k_0$  и  $k_{\text{ин}}$  — скорости коррозии в фоновом растворе и в растворе с изучаемой добавкой.

### Обсуждение результатов

Исследования показали, что монопропаргильный эфир этиленгликоля и хлоргидрин пропаргильного спирта при реакции с треххлористым фосфором в среде сухого бензола образуют пропаргилди- (I) и трихлорфосфиты (II) с выходом 70–80%:

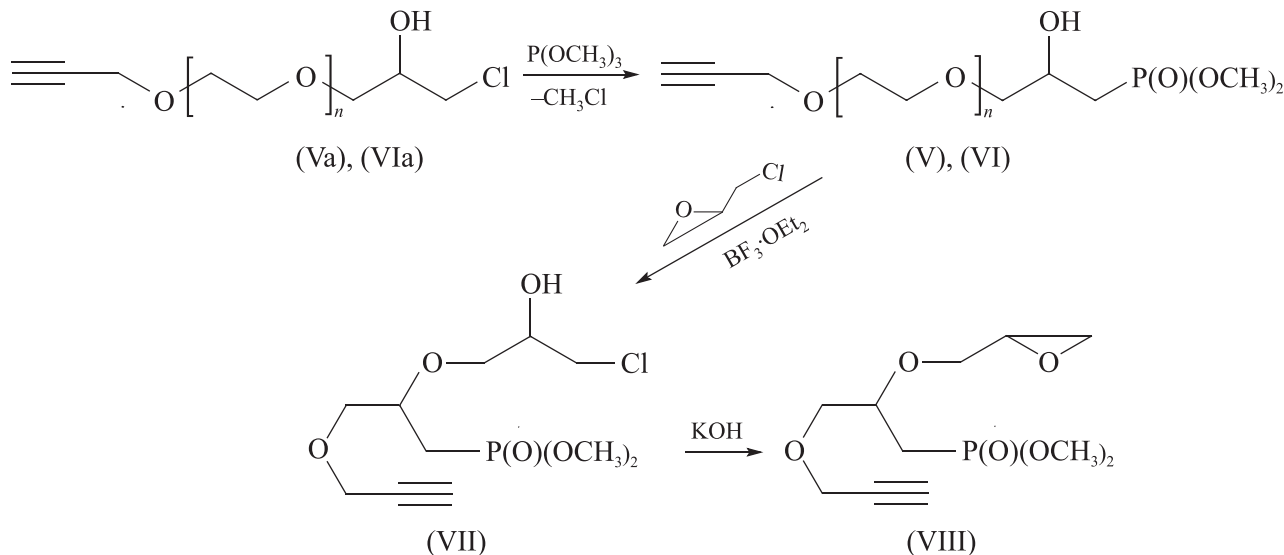
в присутствии акцептора (пиридина) с образованием соответствующих алкоксифосфитов (III), (IV):

минальной ацетиленовой связи. В спектрах ЯМР  $^1\text{H}$  соединений (III), (IV) присутствуют сигналы в виде триплета при  $\delta$  2.42 м. д., относящиеся к протонам фрагмента (1H,  $\equiv\text{CH}$ ).

Показано, что хлоргидрины пропаргильного спирта (Va), (VIa) вступают в реакцию с триметоксифосфитом, образуя фосфорсодержащие эфироспирты пропаргильного ряда (V), (VI). При взаимодействии

эфирспиртов (V), (VI) с эпихлоргидрином в присутствии эфирата трехфтористого бора получают фосфорсодержащие хлоргидрины, которые в дальнейшем без их выделения в присутствии щелочи де-

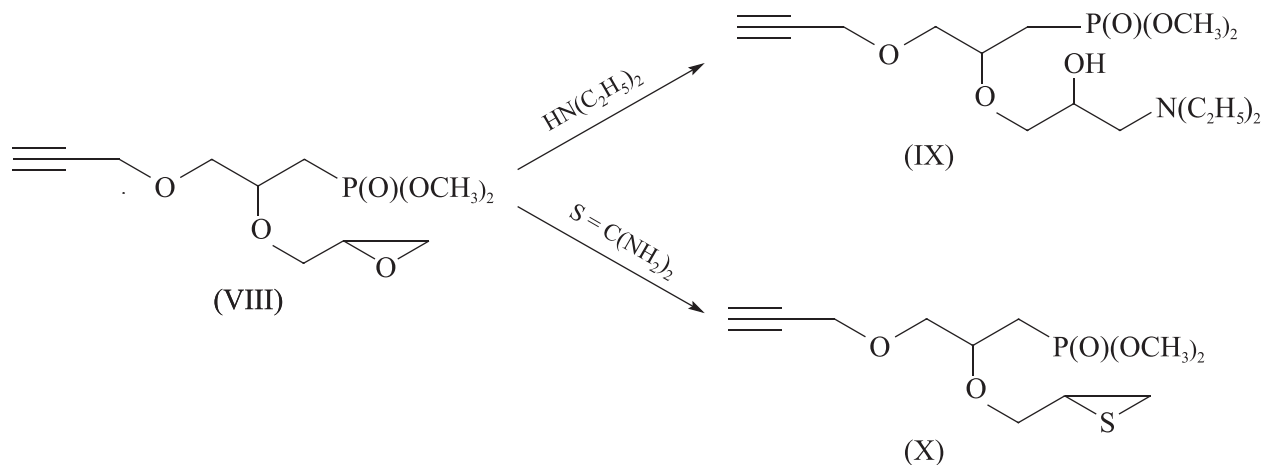
гидрохлорируются с образованием соответствующих фосфорсодержащих эфиров эпоксиацетиленового ряда (VII), (VIII):



Присутствие эпексидного кольца и тройной связи в составе соединения (VIII) подтверждено наличием в ИК-спектре полос поглощения при 3065, 1180, 950  $\text{cm}^{-1}$  и 3300, 2120  $\text{cm}^{-1}$ , характерных для эпексидного цикла и терминального ацетиленового фрагмента. В спектрах ЯМР  $^1\text{H}$  соединения (VIII) идентифицированы следующие сигналы, характерные для эпексидного кольца:  $\delta$  2.55–2.80 м. д. ( $\text{CH}_2$ ),  $\delta$  2.95–3.20 м. д. ( $\text{CH}$ ) в виде мультиплета. Протоны фрагмента  $\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCH}_2$  (6H) проявляются в виде мультиплета в области  $\delta$  3.25–3.70 м. д.

Синтезированный фосфорсодержащий эпексид является весьма реакционноспособным соединением

и вступает в реакции с различными нуклеофильными и электрофильными реагентами, образуя новые фосфорорганические производные ацетиленового ряда. В частности, показано, что синтезированный глицидиловый эфир фосфорсодержащего пропаргилового эфира (VIII) с участием оксиранового цикла вступает в реакцию с диэтиламино по правилу Красусского (в присутствии воды) и тиомочевинной (заменой эпексидного кислорода на серу), образуя соответствующие аминспирт (IX) и тиран (X) с выходом 72.4 и 76.1% соответственно по схеме



Состав и строение полученных соединений (IX), (X) подтверждены данными ИК- и ЯМР  $^1\text{H}$  спектров.

В ИК-спектрах соединений (IX), (X) отсутствуют полосы поглощения, характерные для эпоксидной группы. В ИК-спектре аминспирта (IX) имеются полосы при 2786 ( $\text{N-Et}_2$ ) и 3460  $\text{cm}^{-1}$  для OH-группы. В спектре ЯМР  $^1\text{H}$  аминспирта (IX) появляется сигнал аминметиловой группы в виде квартета при  $\delta$  2.34 м. д., диметильные группы в диэтиловом радикале выходят в виде синглета при  $\delta$  1.35 м. д. и гидроксильная группа – в виде синглета при  $\delta$  3.25 м. д.

В ИК-спектре тирана (X) отсутствуют полосы поглощения, характерные для оксиранового кольца, но при этом обнаружено колебание при 3000  $\text{cm}^{-1}$ , характерное для тиранового цикла. В спектре ЯМР  $^1\text{H}$  соединения (X) имеется сигнал в виде мультиплета при  $\delta$  3.08 м. д., свойственный (1H, CH) протонам фрагмента  $\text{C}\equiv\text{CH}$ , дублеты дублетов с центрами при 2.25 и 2.55 м. д., свойственные *цис*- и *транс*- ( $\text{CH}_2$ ) протонам в тирановом цикле.

Изучение влияния синтезированных пропаргилсодержащих производных фосфористой и фосфоновой кислот на коррозию низкоуглеродистой стали в растворе HCl позволило выявить шесть наиболее перспективных ингибиторов коррозии, свойства которых рассмотрены ниже (см. таблицу). Коррозия стали 08кп в растворе 5 М HCl ускоряется с ростом температуры. Повышение температуры на 40° увеличивает скорость коррозии стали в 34 раза.

В растворе HCl в выбранном диапазоне температур все изучаемые добавки замедляют коррозию стали, этот эффект тем сильнее, чем выше содержание ингибитора в коррозионной среде. Как и в фоновых растворах, повышение температуры ингибированной коррозионной среды ускоряет коррозию стали. Оценка эффективности ингибиторной защиты металла при повышении температуры невозможна без учета соотношения скоростных характеристик коррозионного процесса в фоновых и ингибированных растворах, что наиболее корректно численно характеризуется коэффициентом торможения. В идеале при повышении температуры темп ускорения коррозии в ингибированном растворе должен быть ниже, чем в фоновой среде. В этом случае защита металла будет эффективна, а значения величин коэффициентов торможения коррозии стали в присутствии ингибитора должны расти при увеличении температуры. В наших условиях это наблюдается для всех исследованных соединений.

Среди изученных ацетиленовых эфиров наименее эффективно защищают сталь соединения (III) и

(IV), замедляющие коррозию в 1.8–70 и 3.3–62 раза соответственно. Более существенную защиту стали обеспечивают соединения (IX) и (X), замедляющие коррозию в 4.2–85 и 4.9–90 раз.

Наиболее высокие защитные эффекты на стали в растворе HCl наблюдаются для соединений (V) и (VI), которые снижают скорость коррозии в 4.2–130 и 8.3–220 раз. В присутствии 1 г·л<sup>-1</sup> соединения (VI), которое лучше всего защищает сталь, при увеличении температуры на 40° значение скорости коррозии повышается лишь в 1.7 раза, а ее максимальное значение составляет 1.3 г·м<sup>-2</sup>·ч<sup>-1</sup>.

Таким образом, синтезированные фосфорсодержащие эфиры пропаргилового спирта являются эффективными ингибиторами коррозии стали в растворах HCl. Для них при 60°С значение коэффициентов торможения коррозии не ниже 32. Наиболее высокую защиту стали в HCl в условиях эксперимента обеспечивает добавка соединения (VI).

Представляется важным обсудить механизм защитного действия исследуемых соединений. Известно, что в основе защитного действия ацетиленовых соединений при коррозии стали в растворах HCl может лежать их способность адсорбироваться на поверхности металла в неизменном виде (адсорбционный механизм) или формировать на металле полимерный защитный слой (адсорбционно-полимеризационный механизм). Только ингибиторы, проявляющие адсорбционно-полимеризационный механизм действия, способны обеспечивать эффективную защиту стали при ее коррозии в жестких условиях горячих растворов HCl с высокой концентрацией кислоты. Адсорбционно-полимеризационный механизм действия характерен для соединений, содержащих в своем составе терминальную ацетиленовую связь [8]. Все исследованные соединения содержат в своем составе такую связь, что позволяет предположить для них именно этот механизм действия. В пользу такого предположения косвенно свидетельствует факт роста защитного действия этих ингибиторов с увеличением температуры, а также достаточно высокие значения их коэффициентов торможения коррозии, наблюдаемые при 60°С.

Несколько неожиданный результат был получен для ингибиторов, содержащих амино- [соединение (IX)] и меркапто- [соединение (X)] группы. Обычно введение таких структурных фрагментов в молекулы ингибиторов существенно усиливает их защитное действие. Однако в случае фосфорсодержащих эфиров пропаргилового спирта этого эффекта не наблюдалось. Напротив, наиболее высокие защитные эффекты в торможении коррозии стали проявляют эфиры, содержащие в своем составе спиртовые

Скорости коррозии стали 08кп в 5 М НСl, содержащей добавки фосфорсодержащих эфиров пропаргилового ряда\*

Соединение	Формула ингибитора	Температура, °С	Концентрация ингибитора, г·л <sup>-1</sup>	Скорости коррозии, г·м <sup>-2</sup> ·ч <sup>-1</sup>	Коэффициент торможения коррозии
(III)		20	0.5	4.5	1.8
			1.0	2.5	3.3
		40	0.5	7.6	7.8
			1.0	2.8	21
		60	0.5	8.8	32
			1.0	4.0	70
(IV)		20	0.5	2.5	3.3
			1.0	1.8	4.6
		40	0.5	4.3	14
			1.0	1.8	33
		60	0.5	6	47
			1.0	4.5	62
(V)		20	0.5	2.0	4.2
			1.0	1.5	5.5
		40	0.5	3.1	19
			1.0	2.0	30
		60	0.5	3.3	85
			1.0	2.1	130
(VI)		20	0.5	1.0	8.3
			1.0	0.75	11
		40	0.5	2.1	28
			1.0	1.0	59
		60	0.5	4.0	70
			1.0	1.3	220
(IX)		20	0.5	2	4.2
			1.0	0.87	9.5
		40	0.5	2.3	26
			1.0	1.2	49
		60	0.5	4.0	70
			1.0	3.3	85
(X)		20	0.5	1.7	4.9
			1.0	1.1	7.5
		40	0.5	3.1	19
			1.0	2.9	20
		60	0.5	3.7	76
			1.0	3.1	90

\* Скорости коррозии стали 08кп в 5 М НСl при 20, 40 и 60°С составляют 8.3, 59 и 280 г·м<sup>-2</sup>·ч<sup>-1</sup> соответственно.

группы [соединения (V) и (VI)]. Видимо, их наличие придает этим соединениям большую растворимость в кислотах, тем самым, способствуя их высокому защитному действию. Важность хорошей растворимости ацетиленовых соединений в коррозионной среде для проявления высоких защитных эффектов известна давно [3].

### Выводы

Синтезированы новые фосфорорганические эфиры пропаргилового ряда, изучены их свойства. Синтезированные соединения обладают высоким защитным действием при коррозии низкоуглеродистой стали в растворах соляной кислоты. Определены коэффициенты торможения коррозии стали синтезированными соединениями и установлено, что они увеличиваются при повышении содержания ацетиленового соединения в коррозионной среде и ее температуры.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

### Информация об авторах

*Шатинова Махруза Исмаил кызы*, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7305-9981>

*Авдеев Ярослав Геннадиевич*, д.х.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7344-1961>

### Список литературы

- [1] *Глуценко В. Н., Силин М. А.* Нефтепромысловая химия: Изд. в 5 томах. Т. 4. Кислотная обработка скважин / Под ред. И. Т. Мищенко. М.: Интерконтакт Наука, 2010. С. 17–18.
- [2] *Finšgar M., Jackson J.* Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: A review // *Corrosion Sci.* 2014. V. 86. P. 17–41. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.04.044>
- [3] *Авдеев Я. Г., Кузнецов Ю. И.* Физико-химические аспекты ингибирования кислотной коррозии металлов ненасыщенными органическими соединениями // *Успехи химии.* 2012. Т. 81. № 12. С. 1133–1145 [*Avdeev Ya. G., Kuznetsov Yu. I.* Physicochemical aspects of inhibition of acid corrosion of metals by unsaturated organic compounds // *Russ. Chem. Rev.* 2012. V. 81. N 12. P. 1133–1145. <https://doi.org/10.1070/RC2012v081n12ABEH004292>].
- [4] *Dkhireche N., Dahami A., Rochdi A., Hmimou J., Touir R., Ebn Touhami M., El Bakri M., El Hallaoui A., Anouar A., Takenouti H.* Corrosion and scale inhibition of low carbon steel in cooling water system by 2-propargyl-5-o-hydroxyphenyltetrazole // *J. Ind. Eng. Chem.* 2013. V. 19. P. 1996–2003. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.03.012>
- [5] *Mazumder M. A. J., Al-Muallem H. A., Faiz M., Ali S. A.* Design and synthesis of a novel class of inhibitors for mild steel corrosion in acidic and carbon dioxide-saturated saline media // *Corrosion Sci.* 2014. V. 87. P. 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.06.026>
- [6] *Frignani A., Monticelli C., Zucchi F., Trabanelli G.* Acetylenic alcohols as inhibitors of iron acid corrosion. Improvement of the inhibition efficiency of a class of substances based on their action mechanism // *Int. J. Corrosion Scale Inhibition.* 2014. V. 3. N 2. P. 105–119. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2014-3-2-105-119>
- [7] *Jayaperumal D.* Effects of alcohol-based inhibitors on corrosion of mild steel in hydrochloric acid // *Mater. Chem. Phys.* 2010. V. 119. N 3. P. 478–484. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.09.028>
- [8] *Подобаев Н. И., Авдеев Я. Г.* Влияние строения молекул ацетиленовых соединений на кинетику электродных реакций, протекающих на железе в соляной и серной кислотах // *Защита металлов.* 2002. Т. 38. № 1. С. 51–56 [*Podobaev N. I., Avdeev Ya. G.* Effect of the molecule structure of acetylene compounds on the kinetics of the electrode reactions of iron in hydrochloric and sulfuric acid // *Protection of Metals.* 2002. V. 38. N 1. P. 45–50. <https://doi.org/10.1023/A:1013852801262>].