

УДК 620.193:621.892

## Защита стали электроосажденным супергидрофобным Cu-Zn покрытием в сероводородсодержащих средах

Л.Д. Родионова, Л.Е. Цыганкова\*, А.А. Дьяков,  
Д.А. Горлов и И.А. Ломакина

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина»,  
РФ, 392000, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33

E-mail: [vits21@mail.ru](mailto:vits21@mail.ru)

### Аннотация

Супергидрофобное покрытие (СГФП) на стали, полученное путем электроосаждения меди и цинка с последующей обработкой этанольным раствором миристиновой кислоты, характеризуется краевым углом смачивания  $157 \pm 2^\circ$ . Выдержка стальных образцов с покрытием в течение 10 суток в газовой и жидкой фазах растворов NACE и NaCl (50 г/л), содержащих 400 мг/л  $H_2S$ , показала защитный эффект покрытия выше 90% в газовой и примерно на 15% ниже в жидкой фазах. При этом сохранилась супергидрофобность покрытия. Методами потенциодинамической поляризации и импедансной спектроскопии показано, что в среде NACE + 400 мг/л  $H_2S$  СГФП вызывает замедление анодного процесса на стали.

**Ключевые слова:** супергидрофобное покрытие, защитный эффект, коррозия, сероводород, поляризация, импедансная спектроскопия.

Поступила в редакцию 19.04.2026 г.; После доработки 27.04.2026 г.; Принята к публикации 27.04.2026 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2026-4-2-130-141](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2026-4-2-130-141)

### Введение

Коррозия углеродистых сталей – одна из ключевых проблем в ряде промышленных отраслей, включая нефтегазовую, химическую и энергетическую. Особую сложность представляют среды с высоким содержанием сероводорода: они провоцируют ускоренную деструкцию металлических конструкций из-за образования сульфидов железа и развития водородного охрупчивания. Это ведёт к значительным экономическим потерям и повышает риски аварийных ситуаций.

В последние годы супергидрофобные покрытия (СГФП) широко исследуются в области защиты металлов от коррозии. Такое покрытие способно захватывать

пузырьки воздуха, образуя множество так называемых «воздушных карманов» на поверхности. За счет этого оно обладает высокой водоотталкивающей способностью, агрессивные среды изолируются от поверхности, что, в свою очередь, обеспечивает защиту от коррозии. Были предложены различные технологии нанесения СГФП, среди которых довольно широкое распространение получило электрохимическое осаждение.

Электроосаждение давно известно и широко применяется в промышленности. Морфологию поверхности легко контролировать, изменяя параметры осаждения: ток, напряжение, время и т.д. Получение СГФП методом электроосаждения имеет большой потенциал для масштабного промышленного применения [1–3]. В исследовании [4] был разработан метод получения СГФП на поверхности стали Х90, основанный на комбинировании электроосаждения сплава Cu-Zn и химического окисления в растворе КОН и  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ , с последующей модификацией полученных микроструктур пентадекафтороктановой кислотой для достижения супергидрофобных свойств. Контактный угол смачивания водой составил около  $156,81^\circ$ . Долговечность СГФП была оценена путем выдерживания образца при температуре окружающей среды в течение 6 месяцев. При этом краевой угол смачивания водой этого супергидрофобного образца составил около  $156,92^\circ$ , что свидетельствует о хорошей устойчивости в атмосферных условиях. После погружения в воду на 4 часа или в 3,5%-ный раствор NaCl на 1 час краевой угол смачивания СГФП существенно не изменился. Химическую стабильность СГФП проверяли, измеряя краевой угол смачивания при pH от 1 до 13. Краевой угол смачивания превышал  $150^\circ$ , за исключением сред с pH, равным 11, 12 и 13.

В работе [5] были получены покрытия Cu-Zn с различной морфологией поверхности на стальной подложке путем изменения параметров электроосаждения: плотность тока, молярное соотношение  $\text{Zn}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$  и время электроосаждения. Было обнаружено, что электроосажденные покрытия Cu-Zn после высыхания проявляют супергидрофильные свойства. После хранения этих покрытий на воздухе более 60 суток поверхность изменяла свои свойства на супергидрофобные с максимальным краевым углом смачивания  $154,73^\circ$ . Экспериментально показано, что супергидрофобности покрытия способствуют как иерархическая структура, так и химический состав (образование CuO-ZnO и адсорбция кислорода). Кроме того, это супергидрофобное медно-цинковое покрытие обладает превосходными свойствами долговечности, самоочистки, антикоррозионными и противонакипными свойствами. По данным поляризационных кривых, скорость коррозии образца с СГФП в 3,5% растворе NaCl составляет  $4,3115 \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>, что на 1 порядок меньше по сравнению с таковой у стальной подложки. В [6] описан процесс подготовки СГФП Co-Ni на подложке из углеродистой стали с помощью метода электроосаждения. Осажденное покрытие Co-Ni с микронаноструктурами после модификации перфтороктилтрихлорсиланом проявляет высокие супергидрофобные

свойства с краевыми углами более  $161^\circ$ . Электрохимические испытания показали, что полученные защитные покрытия демонстрируют хорошие антикоррозионные свойства и обеспечивают защиту подложек из углеродистой стали. Исследования проводили в 3,5%-ном растворе NaCl методами электрохимической импедансной спектроскопии и потенциодинамической поляризации после выдержки образцов в течение 1 часа. По данным импедансной спектроскопии, защитный эффект СГФП составляет более 99%, что согласуется с результатами поляризационных измерений, согласно которым скорость коррозии углеродистой стали без покрытия составила  $1,23 \cdot 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>, тогда как с СГФП Co-Ni –  $5,87 \cdot 10^{-7}$  А/см<sup>2</sup>. Как правило, в большинстве исследований защитный эффект СГФП определяется в среде NaCl, не содержащей коррозионно-активных добавок, при ограниченной продолжительности.

Целью данной работы является получение на стали методом электроосаждения Cu-Zn СГФП и изучение его защитных свойств в сероводородсодержащих средах при длительной экспозиции.

### Методика эксперимента

Были использованы образцы стали Ст3 (30x40x1 мм) состава, масс. %: С – 0,28; Mn – 0,70; Si – 0,15; P – 0,04; S – 0,05; Cr – 0,30; Ni – 0,20; Cu – 0,20, остальное Fe. СГФП на стальных образцах получали электроосаждением меди и цинка с учетом эксперимента [5] с некоторой модификацией. Отшлифованные и обезжиренные ацетоном образцы стали выдерживали в 10%-ном растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в течение 2 мин. Далее промытый дистиллированной водой образец в качестве катода помещался в раствор состава ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O (29 г/л) + CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O (25 г/л) + C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub>KNa·4H<sub>2</sub>O (100 г/л) + NaOH (50 г/л). Электроосаждение проводилось при плотности тока 8 А/дм<sup>2</sup> в течение 7 мин с платиновым анодом. Далее промытый дистиллированной водой и высушенный образец выдерживался в течение 1 часа в 0,1 М этанольном растворе миристиновой кислоты. Краевой угол смачивания составил  $157 \pm 2^\circ$ .

Морфология покрытия оценивалась посредством сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) (JSM 6390, JEOL, Япония), а элементный состав – посредством микроскопа JCM-7000, JEOL (Япония 2021). Краевые углы смачивания измерялись в 10 различных точках на поверхности при нанесении капель дистиллированной воды размером 3–4 мкл с использованием тензиометра (Easy Drop, KRUSS, Германия).

Защитную эффективность полученного СГФП исследовали при комнатной температуре в течение 240 час (10 суток) гравиметрическим методом в газовой и жидкой фазах растворов NaCl (50 г/л) + H<sub>2</sub>S (400 мг/л), NACE + H<sub>2</sub>S (400 мг/л), а также электрохимическими методами в растворе NACE + H<sub>2</sub>S (400 мг/л). NACE – среда, используемая в Национальной Ассоциации Инженеров-Коррозионистов США, состава, г/л: NaCl – 5; CH<sub>3</sub>COOH – 0,25.

Поляризационные потенциодинамические (скорость наложения потенциала 0,66 мВ/с) и импедансные измерения проводили по методике, описанной в [7], через

15 мин после погружения электрода с СГФП в раствор NACE + 400 мг/л  $H_2S$  и далее через каждые сутки в течение 168 часов без извлечения из раствора. Параллельно проводились измерения на стальном электроде без покрытия.

Величину защитного эффекта ( $Z$ , %) покрытия рассчитывали по формулам:

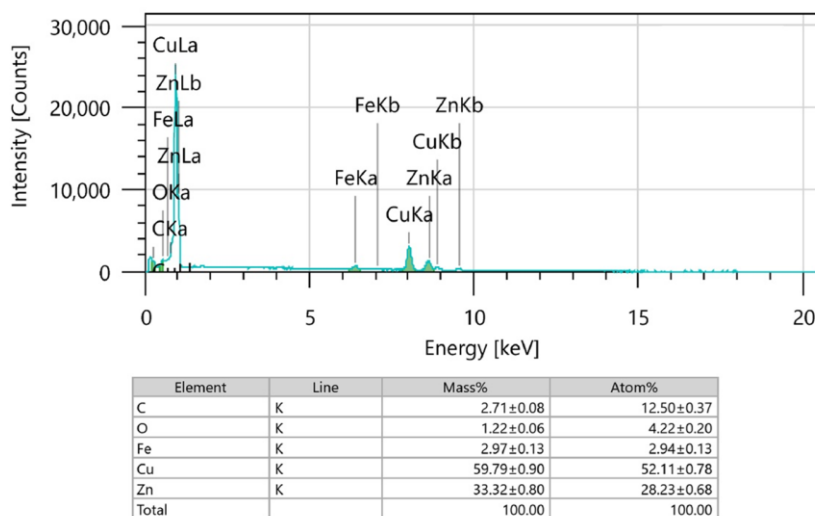
$$Z, \% = 100(K_0 - K_{\text{СГФП}})/K_0 \quad (1)$$

$$Z, \% = 100(i_0 - i_{\text{СГФП}})/i_0 \quad (2)$$

где  $K_0(i_0)$  и  $K_{\text{СГФП}}(i_{\text{СГФП}})$  – скорость (плотность тока) коррозии в отсутствие и в присутствии СГФП, соответственно. Величины  $i_0$  и  $i_{\text{СГФП}}$  определяли на основе поляризационных кривых (ПК) путем экстраполяции их тафелевских участков на потенциал коррозии.

## Результаты и обсуждение

На Рисунке 1 приведен спектр СГФП на основе электроосажденного Cu - Zn, элементный состав которого подтверждает модификацию поверхности в растворе миристиновой кислоты.



**Рисунок 1.** Спектр СГФП на основе Cu - Zn и его элементный состав.

Углеродистая сталь Ст3 в газовых и жидких фазах растворов NaCl и NACE, насыщенных сероводородом в концентрации 400 мг/л, имеет близкие значения  $K$ . При этом в жидкой фазе сред  $K$  имеет более высокие значения. Также необходимо отметить, что в среде NACE скорость коррозии выше, чем в растворе NaCl, что, по-видимому, связано с присутствием уксусной кислоты.

Образцы с супергидрофобным медно-цинковым покрытием в данных средах имеют более низкие  $K$  по сравнению с незащищенной сталью. В газовой фазе защита выше, чем в жидкой, что может быть связано с затрудненным отводом продуктов

коррозии с поверхности. Высокие защитные эффекты также можно связать с образованием нерастворимых сульфидов на поверхности, которые блокируют дальнейшее разрушение образцов.

**Таблица 1.** Скорость коррозии и защитный эффект супергидрофобного покрытия на стали Ст3 в газовой фазе (числитель) и жидкой фазе (знаменатель) исследуемых сред в течение 10 суток (240 час.)

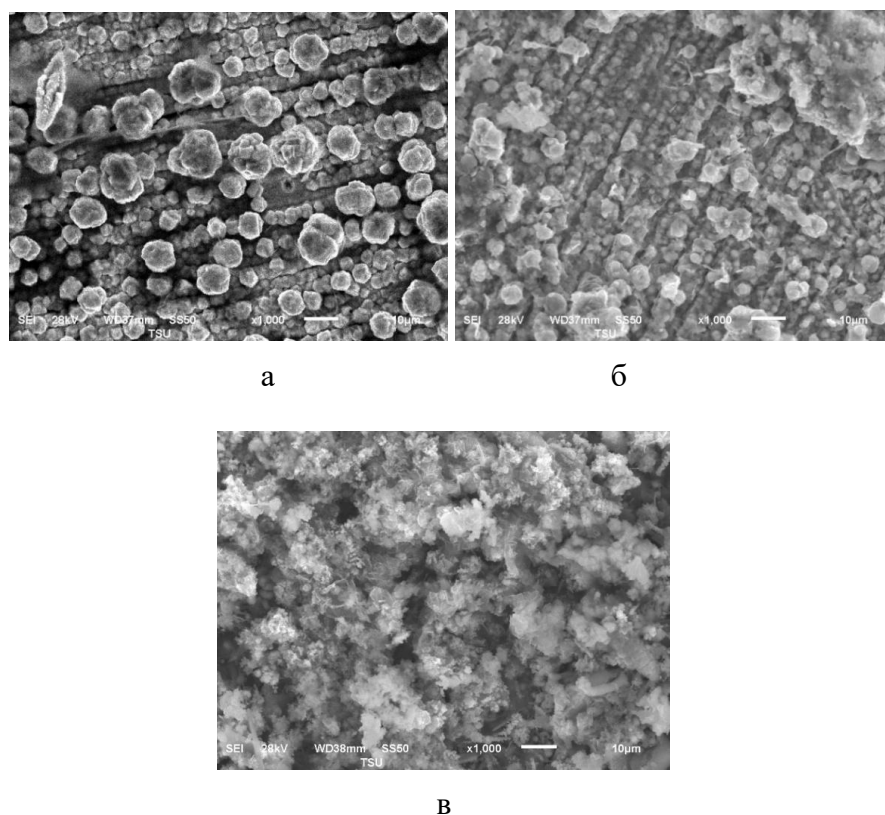
Среда	Образец	K, г/(м <sup>2</sup> час)	Z, %
50 г/л NaCl + 400 мг/л H <sub>2</sub> S	Без покрытия	0,1624 / 0,1864	–
	с СГФП	0,0057 / 0,0319	96 / 83
NACE + 400 мг/л H <sub>2</sub> S	Без покрытия	0,2003 / 0,2152	–
	с СГФП	0,0180 / 0,0504	91 / 77

На Рисунке 2а представлено изображение исходной поверхности СГФП с полимодальной шероховатостью. На поверхности видны округлые элементы диаметром порядка 10 мкм и меньше, присутствуют мелкие поры и промежутки между крупными элементами, которые могут захватывать пузырьки воздуха. Обработка свежеполученного покрытия этанольным раствором миристиновой кислоты приводит к снижению поверхностной энергии. Совокупность этих факторов дает краевые углы смачивания более 150°.

На Рисунках 2б и 2в представлены изображения поверхности СГФП после коррозионных испытаний в газовой и жидкой фазах NACE + H<sub>2</sub>S. Поверхность после газовой фазы (Рисунок 2б) демонстрирует частичную деградацию микрорельефа. При этом на поверхности формируются локальные сульфидные слои (CuS, ZnS), что видно по изменению цвета поверхности на темно-серую/черную.

Наибольшее изменение морфологии поверхности претерпевает образец, экспонированный в жидкой фазе. При микроскопическом исследовании видны многочисленные углубления, наросты и аморфные структуры размером от 1 до 10 мкм. Поверхность так же, как и в случае образцов, после газовой фазы, приобретает цвет от темно-серого до черного.

Наблюдаемые изменения состояния поверхности образцов согласуются с данными гравиметрических коррозионных испытаний.



**Рисунок 2.** SEM–изображение СГФП поверхности на основе Cu - Zn до (а) и после коррозионных испытаний в газовой фазе (б) и в жидкой фазе (в) среды NACE, насыщенной 400 мг/л  $H_2S$ , при увеличении  $\times 1000$ .

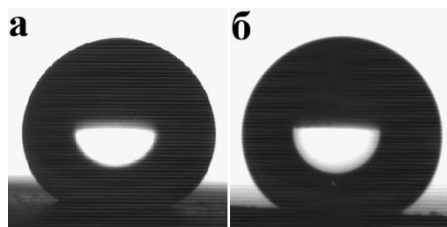
О деградации СГФП также можно судить по изменению краевого угла смачивания поверхности. Как видно из Таблицы 2, после коррозионных испытаний контактные углы снижаются на  $4-6^\circ$ , при этом супергидрофобность покрытия сохраняется во всех случаях.

**Таблица 2.** Краевые углы смачивания СГФП на стали Ст3 до ( $\Theta_1$ ) и после выдержки образцов в среде ( $\Theta_2$ ), через 14 дней ( $\Theta_3$ ), через 2 ( $\Theta_4$ ) и 12 ( $\Theta_5$ ) месяцев выдержки на воздухе

Среда	Фаза	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$\Theta_3$	$\Theta_4$	$\Theta_5$
50 г/л NaCl + 400 мг/л $H_2S$	Газовая	158	154	157	158	158
	Жидкая	158	153	155	157	157
NACE + 400 мг/л $H_2S$	Газовая	156	152	154	156	156
	Жидкая	157	151	155	157	157

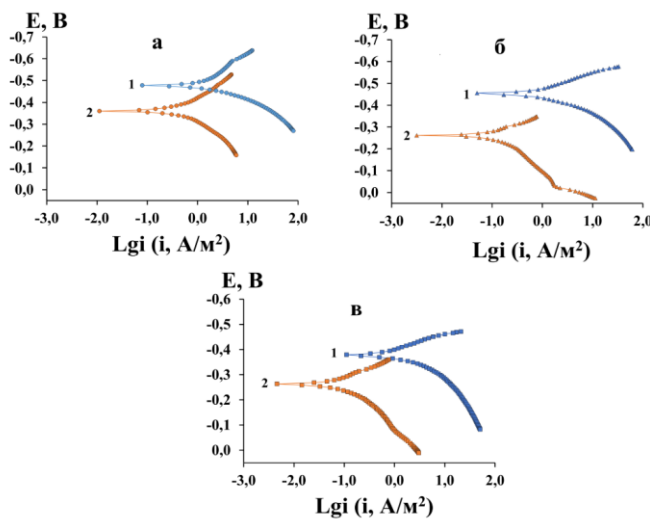
После испытания образцы хранились на воздухе. Уже через 14 дней наблюдалось увеличение контактных углов, через 2 месяца углы достигли исходных значений и далее в течение года не изменялись (Рисунок 3). По-видимому,

образующиеся на поверхности сульфидные отложения создают многомодальную шероховатость и позволяют сохранять супергидрофобное состояние поверхности.



**Рисунок 3.** Капли дистиллированной воды на образцах СГФП после экспозиции в газовой (а) и жидкой (б) фазах раствора NaCl + H<sub>2</sub>S после 12 месяцев выдержки на воздухе

Поляризационные измерения, проведенные в среде NACE, насыщенной 400 мг/л H<sub>2</sub>S (Рисунок 4), свидетельствуют о замедлении анодного процесса на стали с СГФП по сравнению с непокрытым образцом.



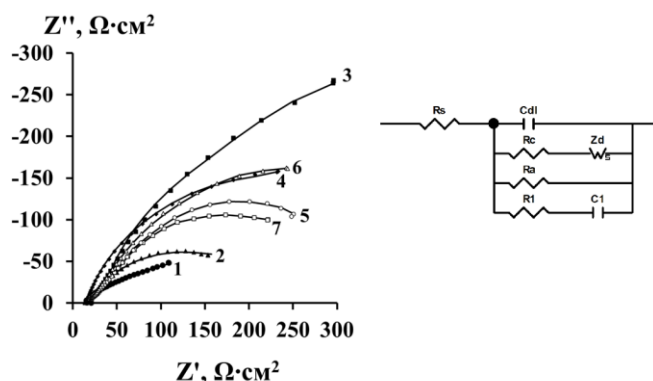
**Рисунок 4.** Поляризационные кривые стального электрода в среде NACE+400 мг/л H<sub>2</sub>S без (1) и с СГФП (2) после выдержки в течение, час: 0,25 – а; 24 – б; 168 – в.

Через 15 минут выдержки стальной электрод характеризуется потенциалом коррозии  $E_{кор}$  близким к  $-0,49$  В и скоростью коррозии  $i_{кор}$   $0,5754$  А/м<sup>2</sup>. В то же время  $E_{кор}$  электрода с покрытием смещен в более положительную область относительно незащищенного образца и составляет  $-0,36$  В, защитный эффект покрытия  $Z$  равен  $76,6\%$ . Тафелевские коэффициенты наклонов катодной  $b_k$  и анодной  $b_a$  кривых для незащищенного электрода составляют  $0,121$  В и  $0,046$  В, соответственно. Тогда как для электрода с СГФП  $b_k$  и  $b_a$  имеют одинаковое значение  $0,054$  В.

При увеличении времени выдержки образцов в среде до 24 ч для электрода без покрытия потенциал смещается в более положительную область, скорость коррозии снижается до  $0,3162 \text{ A/m}^2$ . Образец с СГФП характеризуется снижением  $i_{\text{кор}}$  до  $0,0497 \text{ A/m}^2$  и смещением  $E_{\text{кор}}$  в более положительную область значений.  $b_k$  стали без покрытия снижается до  $0,068 \text{ В}$ ,  $b_a$  не изменяется. Для электрода с покрытием наблюдается увеличение  $b_k$  и  $b_a$  до  $0,074 \text{ В}$  и  $0,064 \text{ В}$ , соответственно. Защитный эффект покрытия составляет 84,3%.

Дальнейшее увеличение времени до 168 ч приводит к увеличению скорости коррозии незащищенного образца до  $0,4266 \text{ A/m}^2$ . При этом для защищенного электрода наблюдается стационарное состояние:  $E_{\text{кор}}$ ,  $i_{\text{кор}}$ ,  $b_k$  и  $b_a$  имеют близкие значения с параметрами, полученными при 24 ч выдержки в среде. Защитный эффект покрытия составляет 88,3%.

Результаты электрохимических импедансных измерений приведены на Рисунке 5. Радиус годографов увеличивается с увеличением времени экспозиции образцов от 15 минут до 48 ч, что говорит о снижении скорости коррозии, дальнейшая выдержка образцов в среде приводит к колебаниям радиусов.



**Рисунок 5.** Диаграммы Найквиста стального электрода с СГФП на основе Cu - Zn в среде NACE, насыщенной 400 мг/л  $\text{H}_2\text{S}$ , при  $E_{\text{кор}}$  и эквивалентная схема, моделирующая поведение электрода. Время экспозиции в растворе, час: 1 – 0,25; 2 – 24; 3 – 48; 4 – 96; 5 – 120; 6 – 144; 7 – 168.

В приведенной эквивалентной схеме (Рисунок 5)  $R_a$  – поляризационное сопротивление анодной реакции, цепочка Эршлера–Рэндлса  $R_c - Z_d$  описывает импеданс реакции восстановления кислорода (РВК),  $R_c$  – сопротивление переноса заряда в РВК,  $Z_d$  – импеданс диффузии кислорода;  $C_1$ ,  $R_1$  – емкость и сопротивление адсорбции промежуточных соединений анодной реакции. Некоторые основания для добавления  $RC$  – цепочки можно найти в статье [8]. В этой схеме нет разделения всех процессов на процессы в порах и на покрытой поверхности [9]. Например, емкость  $C_{dl}$  представляет собой среднюю по всей поверхности электрода емкость двойного слоя. Раствор NACE кислый ( $\text{pH}=3,6$ ), поэтому имеется термодинамическая возможность протекания реакции выделения водорода (РВВ)

при  $E_{cor}$ . По [9], есть основания считать, что в растворе NACE + 400 мг/л  $H_2S$  РВВ и электровосстановление кислорода могут протекать параллельно. В силу очень малой концентрации ионов водорода, для РВВ будут наблюдаться диффузионные ограничения, как и для РВК. Поэтому катодная реакция разряда  $H^+$  и восстановления  $O_2$  в растворе NACE может моделироваться одной и той же схемой Эршлера – Рэндлса, и измерения в растворе NACE будут давать лишь эффективные параметры диффузионного импеданса. Полученные на основе этой схемы подгоночные кривые удовлетворительно совпадают с экспериментальными точками на диаграмме Найквиста, что свидетельствует о правильном подборе эквивалентной схемы.

**Таблица 3.** Численные значения элементов эквивалентной схемы для стального электрода с СГФП в среде NACE, насыщенной 400 мг/л  $H_2S$

Элемент	Продолжительность экспозиции образцов в растворе, ч						
	0,25	24	48	96	120	144	168
$R_s$ , Ом·см <sup>2</sup>	15,4	13,7	15,0	14,8	15,0	14,5	14,0
$R_c$ , Ом·см <sup>2</sup>	1,6	3,9	15,26	10,7	22,3	12,7	12,8
$R_d$ , Ом·см <sup>2</sup>	566,9	1339,0	2925	1944	2343	1828	1833
$\tau_d$	114,3	32,9	31,6	18,6	18,2	22,7	20,2
$\rho_d$	0,39	0,57	0,74	0,69	0,74	0,72	0,70
$R_l$ , Ом·см <sup>2</sup>	1,4	72,1	6,74	2,4	15,96	19,1	5,57
$C_l$ , мкФ/см <sup>2</sup>	605,7	675,7	255,6	206,4	193,8	169,8	123,7
$R_a$ , Ом·см <sup>2</sup>	386,3	342,3	859	456,9	374,3	556,5	357,8
$C_{dl}$ , мкФ/см <sup>2</sup>	48,9	115,6	139,0	175,2	160,4	176,1	60,2
$s$ , %	1,4	1,8	2,1	1,0	2,6	3,1	2,2
$R_p$	230,0	272,8	664,8	370,3	323,2	427,3	299,7
$Z$ , %	90,1	81,6	90,0	73,8	66,3	75,7	71,7

На основе численных значений элементов эквивалентной схемы (Таблица 3) рассчитано поляризационное сопротивление  $R_p$  по уравнению (3), используемое для расчета защитного эффекта СГФП по уравнению (4). Поляризационное сопротивление  $R_p$  в методе импедансной спектроскопии представляет собой предел, к которому стремится действительная составляющая импеданса при стремящейся к нулю частоте переменного тока.

$$R_p = [R_a \cdot (R_c + R_d)] / (R_a + R_c + R_d) \quad (3)$$

$$Z, \% = 100 (R_{p, \text{СГФП}} - R_{p,0}) / R_{p, \text{СГФП}} \quad (4)$$

где  $R_{p, \text{СГФП}}$  и  $R_{p,0}$  – поляризационное сопротивление в присутствии и в отсутствие СГФ покрытия соответственно. При вычислении  $Z, \%$  были использованы значения  $R_{p,0}$ , рассчитанные для непокрытого стального электрода по данным ЭИС (не приведены в статье).

Из Таблицы 3 следует, что сопротивление в анодной реакции  $R_a$  значительно выше, чем сопротивление в катодной реакции  $R_c$ , что свидетельствует об анодном контроле процесса и согласуется с данными поляризационных измерений.  $R_c$  имеет меньшие значения по сравнению с сопротивлением массопереноса  $R_d$ , что говорит о существенном вкладе диффузионной составляющей в катодный процесс.

Величины защитной эффективности СГФП на стальных образцах согласуются с соответствующими величинами, рассчитанными на основе поляризационных кривых, некоторые расхождения, очевидно, обусловлены особенностями импедансных измерений.

## Выводы

1. Полученное на стальных образцах супергидрофобное покрытие путем электроосаждения меди и цинка с последующей обработкой этанольным раствором миристиновой кислоты характеризуется краевым углом смачивания, равным  $157 \pm 2^\circ$ .
2. Защитный эффект покрытия при выдержке образцов стали в течение 10 суток в газовой и жидкой фазах растворов NACE + H<sub>2</sub>S и NaCl (50 г/л) + H<sub>2</sub>S составил в газовой фазе 91 и 96 %, в жидкой – 77 и 83%, соответственно.
3. Покрытие сохраняет супергидрофобные свойства даже после коррозионных испытаний, о чем свидетельствуют величины краевых углов смачивания выше  $150^\circ$ . Последующая выдержка на воздухе в течение 2 месяцев привела к увеличению углов смачивания до исходных величин.
4. Методами потенциодинамической поляризации и импедансной спектроскопии показано, что в среде NACE + H<sub>2</sub>S СГФП вызывает торможение анодного процесса с защитным эффектом, через 168 часов равным 88 и 72%, соответственно.

## Благодарности

Исследование выполнено в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина» «Приоритет-2030». Результаты получены с использованием оснащения Центра коллективного пользования научным оборудованием ТГУ имени Г.Р. Державина.

## Список литературы

1. J.G. Liu, X.T. Fang, C.Y. Zhu, X. Xing, G. Cui and Z.L. Li, Fabrication of superhydrophobic coatings for corrosion protection by electrodeposition: A comprehensive review, *Colloids Surf., A*, 2020, **607**, 125498. doi: [10.1016/j.colsurfa.2020.125498](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125498).
2. D. Zhang, L. Wang, H. Qian and X. Li, Superhydrophobic surfaces for corrosion protection: a review of recent progresses and future directions, *J. Coat. Technol. Res.*, 2016, **13**, no. 1, 11–29. doi: [10.1007/s11998-015-9744-6](https://doi.org/10.1007/s11998-015-9744-6)
3. Л.Е. Цыганкова и М.В. Вигдорович, Анतिकоррозионная эффективность супергидрофобных покрытий на металлах. Обзор, *Коррозия: защита материалов и методы исследований*, 2025, **3**, № 1, 1–60 . doi: [10.61852/2949-3412-2024-3-1-1-60](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2024-3-1-1-60)
4. H. Li and S. Yu, Fabrication and theoretical explanation of the superhydrophobic Cu–Zn coating with dandelion-like CuO microstructure, *J. Alloys Compd*, 2017, **691**, 195–205. doi: [10.1016/j.jallcom.2016.08.272](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.272)
5. H Li, S. Yu, J. Hu and X. Yin, Modifier-free fabrication of durable superhydrophobic electrodeposited Cu-Zn coating on steel substrate with self-cleaning, anti-corrosion and antiscaling properties, *Appl. Surf. Sci.*, 2019, **481**, no. 6, 872–882. doi: [10.1016/j.apsusc.2019.03.123](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.123)
6. Y. Xue, S. Wang, P. Bi, G. Zhao and Y. Jin, Super-Hydrophobic Co–Ni Coating with High Abrasion Resistance Prepared by Electrodeposition, *Coatings*, 2019, **9**, no. 4, 232. doi: [10.3390/coatings9040232](https://doi.org/10.3390/coatings9040232)
7. Л.Е. Цыганкова, В.А. Брыксина, О.А. Алехина и Н.В. Шель, Защитная эффективность омега-пропаганды против сероводородной коррозии углеродистой стали, *Практика противокоррозионной защиты*, 2022, **27**, № 4, 36–44. doi: [10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-4](https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-4)
8. В.И. Кичигин, И.И. Замалетдинов и В.Г. Александров, Импеданс электродов из порошковых сталей, инфильтрированных медью, в растворах NaCl, *Коррозия: материалы, защита*, 2014, № 2, 1–12.
9. L.E. Tsygankova, M.N. Uryadnikova, V.I. Kichigin and L.D. Rodionova, Investigation of the corrosion behavior of carbon steel with a protective superhydrophobic coating by impedance spectroscopy method, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2021, **10**, no. 1, 186–205. doi: [10.17675/2305-6894-2021-10-1-11](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2021-10-1-11)

---

## Protection of Steel with an Electrodeposited Superhydrophobic Cu-Zn Coating in Hydrogen Sulfide-Containing Environments

**L.D. Rodionova, L.E. Tsygankova, A.A. Dyakov,  
D.A. Gorlov and I.A. Lomakina**

*G.R. Derzhavin Tambov State University, Tambov, 392000, Russian Federation*

A superhydrophobic coating (SHPC) on steel obtained by electrodepositing copper and zinc followed by treatment with an ethanol solution of myristic acid is characterized by a contact angle of  $157 \pm 2^\circ$ . Exposure of coated steel samples for 10 days in the gas and liquid phases of NACE and NaCl (50 g/L) solutions containing 400 mg/L H<sub>2</sub>S demonstrated a protective effect of over 90% in the gas phase and approximately 15% lower in the liquid phase. At the same time, the coating's superhydrophobicity was maintained. Using potentiodynamic polarization and impedance spectroscopy, it was shown that in a NACE + 400 mg/L H<sub>2</sub>S environment, the coating slows down the anodic process on steel.

**Keywords:** *superhydrophobic coating, protective effect, corrosion, hydrogen sulfide, polarization, impedance spectroscopy*