

**РАЗРАБОТКА БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПАКЕТНОГО ДАТЧИКА  
ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОРРОЗИИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ  
В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ**

**Као Ньят Линь, Д.С. Шевцов, Нгуен Ван Чи, Нонг Куок Куанг,  
Нгуен Ван Хоа, А.Н. Зяблов, И.Д. Зарцын**

Као Ньят Линь (ORCID 0000-0002-5493-092X)\*

Приморское отделение, Совместный Российско-Вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр, ул. Нгуен Тхьен Тхуат, 30, Нячанг, Кхань Хоа, Вьетнам, 57127  
Университет Нячанга, ул. Нгуен Динь Чиеу, 2, Нячанг, Кхань Хоа, Вьетнам, 650000  
E-mail: cnlinh0812@gmail.com\*

Нгуен Ван Чи (ORCID 0000-0002-7428-4814), Нонг Куок Куанг (ORCID 0000-0002-2347-778X)

Приморское отделение, Совместный Российско-Вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр, ул. Нгуен Тхьен Тхуат, 30, Нячанг, Кхань Хоа, Вьетнам, 57127  
E-mail: nguyenvchi@vrtc.org.vn, nquocquang5@gmail.com

Дмитрий Сергеевич Шевцов (ORCID 0000-0003-4480-787X)\*, Илья Давидович Зарцын (ORCID 0000-0002-7161-9754)

Кафедра физической химии, Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж, Российская Федерация, 394018  
E-mail: shevtsov@chem.vsu.ru \*, zar-vrn@mail.ru

Нгуен Ван Хоа (ORCID 0000-0002-7476-2943)

Университет Нячанга, ул. Нгуен Динь Чиеу, 2, Нячанг, Кхань Хоа, Вьетнам, 650000  
E-mail: hoanv@ntu.edu.vn

Александр Николаевич Зяблов (ORCID 0000-0001-9134-464X)

Кафедра аналитической химии, Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж, Российская Федерация, 394018  
E-mail: alex-n-z@yandex.ru

*Предложена конструкция биметаллического пакетного датчика для моделирования коррозии стальной арматуры в бетоне, вызванной гальваническими микропарами, в присутствии хлоридов. Проанализированы пары металлов низкоуглеродистая сталь/медь, низкоуглеродистая сталь/никель, низкоуглеродистая сталь/серебро. Наибольшая чувствительность получена для пары низкоуглеродистая сталь/серебро. Однако с учетом доступности материалов (стоимости), в качестве оптимального решения с перспективой массового изготовления датчиков, принята пара низкоуглеродистая сталь/медь. Изучено влияние толщины пластин металлов и диэлектрика в диапазоне от 0,1 до 5 мм на чувствительность датчика. Наибольшая чувствительность устройства достигается при толщине пластин металлов и диэлектрика 0,1-0,2 мм. Применение более тонких пластин (фольги) повышает риск замыкания устройства и его выхода из строя при подготовке к работе. Проведена апробация датчика, состоящего из 10 пар пластин, в водной вытяжке из бетона в присутствии хлоридов. Установлено значение пороговой концентрации хлорид-ионов  $\geq 0,1$  моль/дм<sup>3</sup>, при которой наблюдается активно-пассивный переход. При дальнейшем увеличении концентрации хлорид-ионов наблюдается возрастание плотности тока на датчике. Плотность тока на датчике, соответствующая пассивному состоянию, составляет 8,6 мкА/см<sup>2</sup> при толщине электролита над поверхностью 20 мм. При наибольшей изученной концентрации хлоридов 1,00 моль/дм<sup>3</sup> превышение плотности тока на датчике относительно пассивного состояния достигает 5,3 раз. Потенциал пластин датчика в состоянии измерения (замыкания через электролит) при увеличении*

*концентрации хлоридов смещается в область более отрицательных значений. Полученные результаты согласуются с данными оценки скорости коррозии по методу поляризационного сопротивления. Биметаллический пакетный датчик может быть использован для создания систем мониторинга коррозии стальной арматуры в бетоне в присутствии хлорид-ионов.*

**Ключевые слова:** биметаллический пакетный датчик, коррозия стальной арматуры, хлориды, мониторинг, железобетонные конструкции

## DEVELOPMENT OF A BIMETALLIC BATCH SENSOR FOR MONITORING STEEL CORROSION IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Cao Nhat Linh, D.S. Shevtsov, Nguyen Van Chi, Nong Quoc Quang, Nguyen Van Hoa, A.N. Zyablov, I.D. Zartsyn

Cao Nhat Linh (ORCID 0000-0002-5493-092X)\*

Coastal Branch, Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center, Nguyen Thien Thuat st., 30, Nha Trang, Khanh Hoa, 57127, Vietnam

Nha Trang University, Nguyen Dinh Chieu st., 2, Nha Trang, Khanh Hoa, 650000, Vietnam

E-mail: cnlinh0812@gmail.com\*

Nguyen Van Chi (ORCID 0000-0002-7428-4814), Nong Quoc Quang (ORCID 0000-0002-2347-778X)

Coastal Branch, Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center, Nguyen Thien Thuat st., 30, Nha Trang, Khanh Hoa, 57127, Vietnam

E-mail: nguyenvchi@vrtc.org.vn, nquocquang5@gmail.com

Dmitry S. Shevtsov (ORCID 0000-0003-4480-787X)\*, Ilya D. Zartsyn (ORCID 0000-0002-7161-9754)

Department of Physical Chemistry, Voronezh State University, Universitetskaya sq., 1, Voronezh, 394018, Russia

E-mail: shevtsov@chem.vsu.ru \*, zar-vrn@mail.ru

Nguyen Van Hoa (ORCID 0000-0002-7476-2943)

Nha Trang University, Nguyen Dinh Chieu st., 2, Nha Trang, Khanh Hoa, 650000, Vietnam

E-mail: hoanv@ntu.edu.vn

Alexander N. Zyablov (ORCID 0000-0001-9134-464X)

Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Universitetskaya sq., 1, Voronezh, 394018, Russia

E-mail: alex-n-z@yandex.ru

*A bimetallic batch sensor has been proposed to model the corrosion of steel reinforcement in concrete, caused by galvanic microcouples, in the presence of chlorides. Three metal pairs, namely low-carbon steel/copper, low-carbon steel/nickel, and low-carbon steel/silver were analyzed. The highest sensitivity was obtained for the low-carbon steel/silver pair. However, taking into account the availability of materials (cost), the low-carbon steel/copper pair was adopted as the optimal solution with the prospect of mass production of sensors. The impact of the thickness of the metal and dielectric plates, ranging from 0.1 to 5 mm, on the sensor sensitivity has been investigated. The highest sensor sensitivity was observed when the thickness of the metal and dielectric plates was between 0.1 and 0.2 mm. Using thinner plates, such as foil, increases the risk of short-circuiting and sensor failure during preparation. A sensor composed of ten pairs of plates was evaluated in a water extract from concrete in the presence of chlorides. The threshold concentration of chloride ions, which initiates an active-passive transition, was found to be  $\geq 0.1 \text{ mol/dm}^3$ . With a further increase in chloride ion concentration, the current density on the sensor increased. The current density on the sensor, corresponding to the passive state, was  $8.6 \mu\text{A/cm}^2$  with an electrolyte thickness above the surface of 20 mm. At the highest chloride concentration studied*

*1.00 mol/dm<sup>3</sup>, the excess of the current density on the sensor relative to the passive state reached 5.3 times. With an increase in the concentration of chlorides, the potential of the sensor plates in the measurement state (in the closed state through the electrolyte) shifted to the region of more negative values. The obtained results are consistent with data on corrosion rate evaluation using the method of polarization resistance. The bimetallic batch sensor has the potential for use in creating monitoring systems for the corrosion of steel reinforcement in concrete in the presence of chloride ions.*

**Key words:** bimetallic batch sensor, corrosion of steel reinforcement, chlorides, monitoring, reinforced concrete structures

**Для цитирования:**

Као Нхят Линь, Шевцов Д.С., Нгуен Ван Чи, Нонг Куок Куанг, Нгуен Ван Хоа, Зяблов А.Н., Зарцын И.Д. Разработка биметаллического пакетного датчика для мониторинга коррозии стальной арматуры в железобетонных конструкциях. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 8 С. 121–128. DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6881.

**For citation:**

Cao Nhat Linh, Shevtsov D.S., Nguyen Van Chi, Nong Quoc Quang, Nguyen Van Hoa, Zyablov A.N., Zartsyn I.D. Development of a bimetallic batch sensor for monitoring steel corrosion in reinforced concrete structures. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 8. P. 121–128. DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6881.

## ВВЕДЕНИЕ

Железобетонные сооружения, расположенные в прибрежных морских районах, регулярно подвергаются воздействию окружающей среды, в том числе хлоридов, которое приводит к коррозии стальной арматуры и обрушению конструкций [1-4]. Один из элементов стратегии предварительного вмешательства основан на идентификации перехода стальной арматуры из пассивного состояния в активное на ранней стадии, когда разрушение защитного слоя еще только началось [5, 6]. При таком подходе затраты на ремонт меньше, чем при капитальном ремонте, а своевременное ингибирование коррозии способно существенно увеличить срок эксплуатации сооружений [7-10].

Коррозия арматуры в железобетонных конструкциях под воздействием хлорид-ионов имеет локальный характер и обусловлена функционированием гальванических макро- и микропар [11, 12]. Микропары функционируют на активных участках с развитой питтинговой и язвенной коррозией. Макропары образованы активными и пассивными участками стальной арматуры [13, 14]. Характерное расстояние между анодными и катодными зонами в случае микропар – от нескольких миллиметров до долей миллиметра и в случае макропар – от нескольких сантиметров до десятков сантиметров [15, 16]. Потенциал свободной коррозии, измеренный на поверхности бетона, на корродирующих участках арматурной стали колеблется в пределах от –400 до –700 мВ (по шкале медно-сульфатного электрода сравнения). Процесс коррозии контролируется реакцией восстановления кислорода на

катоде. В настоящее время большинство исследований датчиков, основанных на принципах функционирования гальванических пар, для обнаружения коррозии арматуры сосредоточено на моделировании макропар. Однако, такие датчики имеют недостаток – при обнаружении коррозии поверхностный пассивный слой на поверхности арматуры разрушается, что требует значительных затрат на восстановление пассивного состояния и извлечение хлоридов [17, 18].

Цель данной работы – разработка и экспериментальное обоснование биметаллического пакетного датчика для мониторинга коррозии стальной арматуры, вызванной гальваническими микропарами, в среде, моделирующей поровую жидкость бетона, в присутствии хлоридов.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения рабочих растворов образцы мелкозернистого бетона готовили из цемента (PCB40 Portland, Nghi Son, Вьетнам), кварцевого песка (фр. 0,2-0,63 мм) и воды в соотношении 2:6:1 (по массе). Затем их выдерживали на воздухе в течение 7 дней для первоначального набора прочности. После чего измельчали в фарфоровой ступке до порошкообразного состояния с диаметром частиц 0,2 мм, контроль осуществляли с помощью сита с подходящими ячейками. Далее порошок бетона сушили до постоянной массы при температуре плюс 105 °С. Для получения растворов, моделирующих поровую жидкость бетона, проводили экстракцию из порошка бетона дистиллированной водой в течение 5 ч при постоянном перемешива-

нии и температуре 25 °С. Соотношение вода/порошок бетона приняли 5:1 по массе. Контроль pH водной вытяжки из бетона осуществляли с помощью портативного pH-метра HI 8314 (Hanna Instruments, Италия) [19]. Значения pH составили 12,0-12,5.

Для изготовления биметаллического пакетного датчика в качестве анода использовали низкоуглеродистую сталь, близкую по составу к арматурной стали марки 35ГС по ГОСТ 5781-82 в форме пластин. Элементный состав анодной стали определялся в соответствии со стандартом ASTM E415:2017 и приведен в таблице.

Таблица

Элементный состав стали анодных пластин  
Table. Elemental composition of anode steel plates

Элемент, масс. % (остальное Fe)											
C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	P	S	Nb	Al	V
0,284	0,196	0,682	0,065	0,194	0,396	0,016	0,011	0,025	0,002	0,003	0,003

В качестве материала катода могут быть использованы металлы, для которых электродный потенциал более положительный, чем у железа (-0,447 В), например, Ni (+0,25 В), Cu (+0,33 В), Ag (+0,799 В) [20]. Для предварительного тестирования материалов катодов были изготовлены электроды с рабочей поверхностью 10×10 мм. Место пайки токовода и нерабочие поверхности изолировали эпоксидной смолой. Таким образом, были получены четыре типа электродов из различных металлов: арматурная сталь, никель марки Н1, медь марки М1 и серебро 999.

Поверхность электродов при подготовке к эксперименту зачищали на тонкой наждачной бумаге с крупностью частиц 3-5 мкм, обезжировали этиловым спиртом (95%) и промывали дистиллированной водой. Далее пары электродов (сталь-никель, сталь-медь, сталь-серебро) помещали друг против друга на расстоянии 5 мм в водную вытяжку из бетона и в водную вытяжку из бетона с добавкой NaCl (1,00 моль/дм<sup>3</sup>) для моделирования локальной активации. Схема расположения электродов показана на рис. 1.

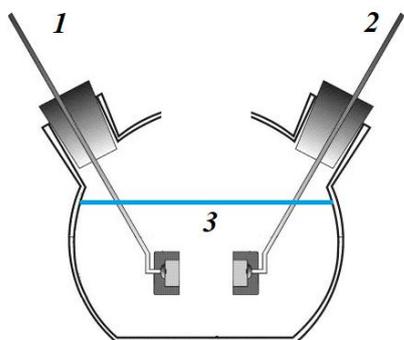


Рис. 1. Схема эксперимента 1 – анод (сталь), 2 – катод (медь, никель или серебро), 3 – раствор электролита  
Fig. 1. Experiment scheme 1 – anode (steel), 2 – cathode (copper, nickel or silver), 3 – electrolyte solution

По результатам предварительных экспериментов изготавливали биметаллический пакетный датчик, который представляет собой набор анодных и катодных пластин, разделенных диэлектрическим слоем (рис. 2), способных генерировать электрический ток при контакте с электролитом. Выводы однородных металлов объединены между собой, и датчик образует пакет гальванических элементов. Величина электрического тока ( $I_{sen}$ ) определяется кинетикой катодного и анодного процессов и омическим падением напряжения между пластинами. При этом плотность тока ( $i_{sen}$ ) рассчитывали относительно видимой площади стальных пластин. Исследование электрохимических характеристик датчика проводили в водных вытяжках из бетона с добавкой NaCl в концентрации от 0,000 до 1,00 моль/дм<sup>3</sup>.

Электродные потенциалы измеряли с помощью Autolab PGSTAT 204N, ток – амперметром Fluke 289 с погрешностью 0,01 мкА. Электродом сравнения служил хлорид-серебряный электрод.

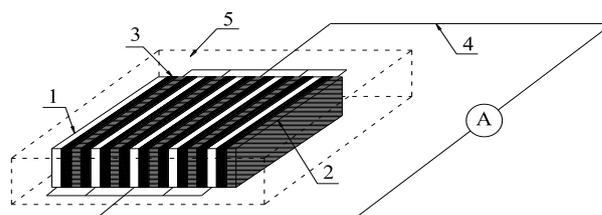


Рис. 2. Схема биметаллического пакетного датчика 1 – анод, 2 – катод, 3 – диэлектрик, 4 – токовод, 5 – слюда  
Fig. 2. Diagram of the bimetallic batch sensor 1 – anode, 2 – cathode, 3 – dielectric, 4 – current lead, 5 – mica

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе эксперимента измеряли гальванический ток в цепи с помощью амперметра с нулевым входным сопротивлением. Результаты измерений представлены на рис. 3. Установлено, что характер зависимостей плотности электрического

тока, измеренного амперметром, сходен для всех рассмотренных пар металлов. Это наблюдалось как в водной вытяжке из бетона, так и в водной вытяжке из бетона с добавкой хлорида.

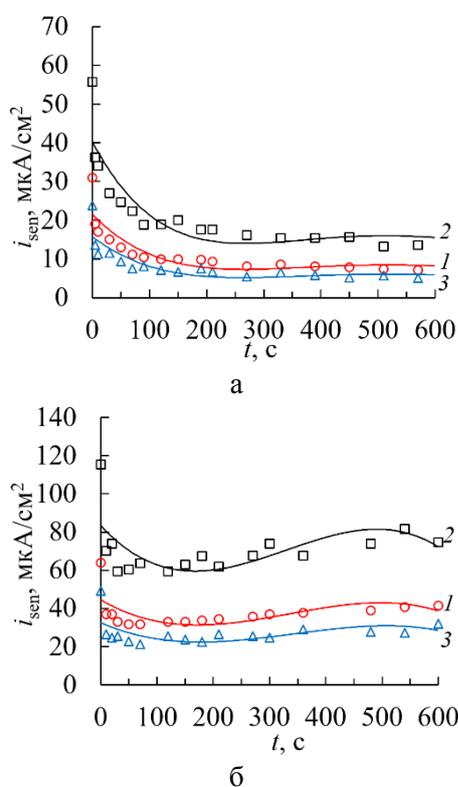


Рис. 3. Зависимость гальванического тока пар электродов (1 – Fe-Cu, 2 – Fe-Ag, 3 – Fe-Ni) от времени а – в водной вытяжке из бетона, б – в водной вытяжке из бетона с добавкой 1,00 моль/дм<sup>3</sup> NaCl

Fig. 3. Dependence of the galvanic current of electrode pairs (1 – Fe-Cu, 2 – Fe-Ag, 3 – Fe-Ni) on time а – in the concrete pore solution, б – in the concrete pore solution with the addition of 1.00 mol/dm<sup>3</sup> NaCl

Отличие заключается в абсолютных значениях  $i_{sen}$ . В ряду пар сталь-никель, сталь-медь, сталь-серебро наблюдается возрастание плотности тока в связи с увеличением разности электродных потенциалов в данном ряду. Более высокая плотность тока при неизменных условиях свидетельствует о более высокой чувствительности датчика. Следовательно, пара металлов сталь-серебро является наиболее чувствительной. При этом различие в величинах плотности тока между парами сталь-серебро и сталь-медь не превышает 2 раз. Учитывая доступность материалов и среднюю чувствительность, было решено использовать пару металлов сталь-медь для изготовления биметаллического пакетного датчика [13].

Были изготовлены пакеты пластин, разделенные слоем диэлектрика (слоуды), толщиной от

0,2 до 5,0 мм для выбранной пары материалов сталь-медь. В экспериментах изменяли или толщину пластин металлов, или толщину пластин диэлектрика в указанном диапазоне. Пакет гальванических элементов с трех сторон изолировали эпоксидной смолой, кроме рабочей поверхности.

Датчики помещали в водную вытяжку из бетона таким образом, чтобы рабочая поверхность была параллельна срезу вытяжки. Толщина водной вытяжки над рабочей поверхностью составляла  $20 \pm 3$  мм.

В качестве результата измерения принимали стационарное значение плотности тока, которое рассчитывали относительно видимой поверхности стальных пластин. Первоначально проводили изучение влияния размера металлических пластин на плотность измеряемого тока, при этом толщина диэлектрических пластин выбрана равной 0,2 мм. Результаты измерений представлены на рис. 4а.

Получено, что уменьшение толщины контактирующих металлических пластин приводит к монотонному увеличению плотности тока. Наибольшая чувствительность наблюдалась при использовании пластин толщиной 0,1-0,2 мм, при этом значения практически не различались. Таким образом, установлено, что для достижения наибольшей чувствительности необходимо использовать металлические пластины толщиной 0,1-0,2 мм. Более тонкие пластины (фольга) не применялись из-за технических ограничений: в процессе шлифовки металл повреждался, что приводило к замыканию датчика.

Далее были проведены эксперименты с различной толщиной слоя диэлектрика в диапазоне от 0,2 до 5 мм. Толщина металлических пластин составляла 0,2 мм. Результаты измерений представлены на рис. 4б. Установлено, что изменение толщины слоя диэлектрика слабо влияет на измеряемый ток, при этом наблюдается тенденция к снижению плотности тока при увеличении толщины диэлектрика. Это, вероятно, связано с влиянием омического сопротивления электролита, но, благодаря высокой электропроводности водной вытяжки, этот эффект незначительный.

Таким образом, была предложена наиболее оптимальная конструкция датчика, состоящая из стальных и медных пластин толщиной 0,1-0,2 мм и слоя диэлектрика 0,2 мм. При такой комбинации достигается наибольшая чувствительность. Затем были изготовлены датчики размером  $60 \times 30 \times 20$  мм,

включающие 10 гальванических пар и имеющие площадь рабочей поверхности в  $0,88 \text{ см}^2$  для последующих экспериментов.

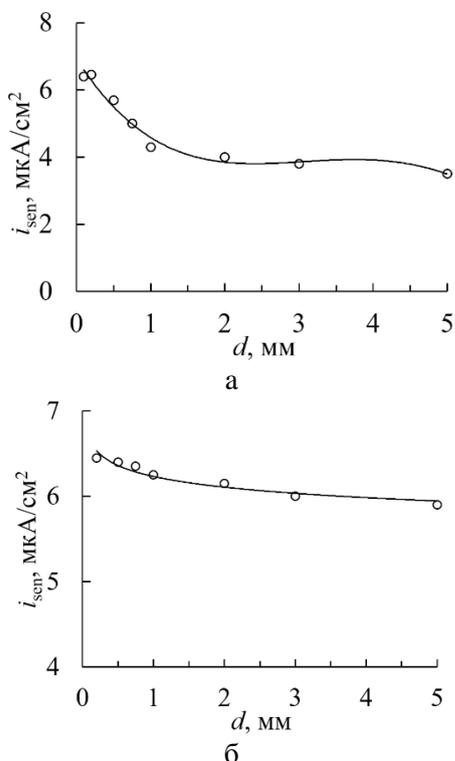


Рис. 4. Зависимость плотности тока на датчике от толщины пластин металла (а) и от толщины диэлектрика в водной вытяжке из бетона (б)

Fig. 4. Dependence of the sensor current density on the thickness of metal plates (a) and the thickness of dielectric (б) in the concrete pore solution

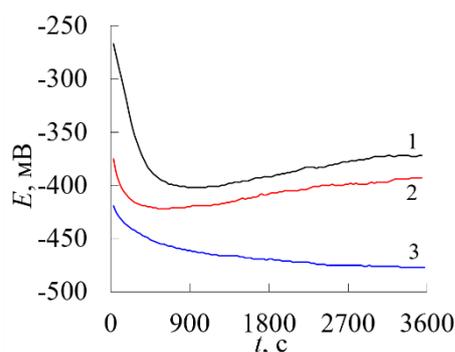


Рис. 5. Изменение потенциала свободной коррозии пластин датчика в замкнутом состоянии во времени в водной вытяжке из бетона, содержащей NaCl с концентрацией: 1 –  $0,000 \text{ моль/дм}^3$ ; 2 –  $0,10 \text{ моль/дм}^3$ ; 3 –  $1,00 \text{ моль/дм}^3$

Fig. 5. The OCP variation of the sensor plates in the closed state over time in the concrete pore solution containing NaCl with a concentration of: 1 –  $0.000 \text{ mol/dm}^3$ ; 2 –  $0.10 \text{ mol/dm}^3$ ; 3 –  $1.00 \text{ mol/dm}^3$

После изготовления датчиков с оптимальной конструкцией проводили измерение потенциала свободной коррозии в водных вытяжках из бетона без и с добавкой NaCl концентрацией  $0,10$  и

$1,00 \text{ моль/дм}^3$  (рис. 5). На графике видно, что в растворе с концентрацией ионов хлоридов  $1,00 \text{ моль/дм}^3$  потенциал датчика смещается в отрицательную область в течение эксперимента и не стабилизируется. В растворах без Cl<sup>-</sup> потенциал сначала снижается в течение первых 10 мин, затем постепенно увеличивается до достижения стабильного значения. Результаты отдельных измерений показывают, что потенциал меди в водных вытяжках из бетона, содержащих  $0,000$ – $1,00 \text{ моль/дм}^3$  Cl<sup>-</sup>, стабилен в диапазоне значений  $-182 \pm 10 \text{ мВ}$ .

Затем были проведены измерения плотности тока на биметаллическом пакетном датчике при различных концентрациях хлоридов в водной вытяжке из бетона. Полученные зависимости плотности тока представлены на рис. 6. При концентрации ионов хлора не более  $0,010 \text{ моль/дм}^3$  плотность тока на датчике сначала достигает максимального значения и затем постепенно снижается. Через приблизительно 10 мин с начала измерения, плотность тока достигает стационарного значения, которое не превышает  $10 \text{ мкА/см}^2$ . Это значение отражает пассивное состояние анода датчика. При содержании  $0,10 \text{ моль/дм}^3$  Cl<sup>-</sup>, плотность тока на датчике сначала уменьшается до минимального значения в  $12 \text{ мкА/см}^2$  через 1 мин погружения датчика, затем постепенно увеличивается и достигает значения  $32 \text{ мкА/см}^2$  через 60 мин. Для раствора с содержанием  $1,00 \text{ моль/дм}^3$  Cl<sup>-</sup>, плотность тока на датчике сначала снижается до минимального значения в  $45,7 \text{ мкА/см}^2$  через 50 с, а затем постепенно увеличивается. При этом наблюдается отсутствие тенденции к достижению стационарного состояния в течение эксперимента. Стационарное значение плотности тока на датчике в водной вытяжке без хлоридов составляет  $8,6 \text{ мкА/см}^2$ , что в 1,4 и 5,3 раза меньше соответствующих значений минимальной плотности тока на датчике в растворах с содержанием хлор-ионов в  $0,10$  и  $1,00 \text{ моль/дм}^3$  Cl<sup>-</sup>. Установлено, что увеличение концентрации хлоридов приводит к увеличению минимальной плотности тока на датчике. В случае растворов с  $0,10 \text{ моль/дм}^3$  Cl<sup>-</sup>, плотность тока коррозии увеличивается со временем и наблюдается отсутствие тенденции тока к достижению стационарного состояния.

Таким образом, датчик предложенной конструкции обладает высокой чувствительностью к хлоридной коррозии стали в щелочном растворе (моделирующем электролит в капиллярно-поровой системе бетона), которая протекает с образованием питтингов, и позволяет идентифицировать момент времени, в который происходит нарушение пассивного состояния.

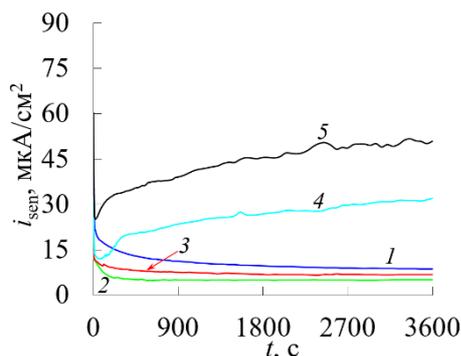


Рис. 6. Изменение плотности тока на датчике, помещенном в водную вытяжку из бетона с различной концентрацией NaCl, моль/дм<sup>3</sup>: 1 – 0,000; 2 – 0,001; 3 – 0,010; 4 – 0,10; 5 – 1,00

Fig. 6. The current density variation on a bimetallic batch sensor immersed in the concrete pore solution containing different concentrations of NaCl, mol/dm<sup>3</sup>: 1 – 0.000; 2 – 0.001; 3 – 0.010; 4 – 0.10; 5 – 1.00

### ВЫВОДЫ

В ходе исследования предложена оптимальная конструкция биметаллического пакетного датчика (из числа рассмотренных сочетаний материалов катода и толщины пластин) для оценки коррозии стальной арматуры, вызванной микрогальваническими микропарами, в среде, моделирующей поровую жидкость бетона в присутствии хлоридов. Устройство состоит из пластин меди марки М1 и низкоуглеродистой стали, близкой по составу к арматурной, толщиной 0,1-0,2 мм, разделенных пластинами диэлектрика толщиной 0,2 мм. Установлено

значение плотности тока на датчике (8,6 мкА/см<sup>2</sup>), соответствующее пассивному состоянию. При превышении концентрации хлоридов 0,10 моль/дм<sup>3</sup>, наблюдается увеличение плотности тока на датчике до 45 мкА/см<sup>2</sup>. Применение разработанных биметаллических пакетных датчиков, моделирующих коррозионные микропары, позволит обнаруживать коррозию арматуры на начальной стадии, т.е. идентифицировать момент времени, в который происходит нарушение пассивного состояния.

Као Ньят Линь был поддержан Программой стипендий для постдокторских исследований Инновационного фонда Vingroup (VINIF), код VINIF.2022.STS.12. Работа выполнена также при поддержке Совместного Российско-Вьетнамского тропического научно-исследовательского и технологического центра (проект № 931/QĐ-TTNDVN).

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

Cao Nhat Linh was funded by the Postdoctoral Scholarship Programme of Vingroup Innovation Foundation (VINIF), code VINIF.2022.STS.12. This research was also supported by the Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center (project number 931/QĐ-TTNDVN).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бикутьчус Г. // *Защита металлов*. 2005. Т. 41. № 5. С. 520-522.
2. James A., Bazarchi E., Chiniforush A.A., Aghdam P.P., Hosseini M.R., Akbarnezhad A., Martek I., Ghodoosi F. // *Construct. Build. Mater.* 2019. V. 224. P. 1026-1039. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.250.
3. Tran N.L., Phan V.P., Valeriy M. // *Architect. Eng.* 2021. V. 6. N 2. P. 37-44. DOI: 10.23968/2500-0055-2021-6-2-37-44.
4. Guo A., Li H., Ba X., Guan X., Li H. // *Eng. Struct.* 2015. V. 105. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.09.031.
5. Као Ньят Линь, Нгуен Ван Чи, Донг Ван Киен, Ле Хонг Куан, Нонг Куок Куанг, Нгуен Дык Ань, Нгуен Тхи Хонг Сань, Зяблов А.Н. // *Бутлеров. сообщ.* 2021. Т. 67. № 8. С. 74-78. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/21-67-8-74.
6. Borah M.M., Dey A., Sil A. // *Structures*. 2020. V. 23. P. 191-203. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.09.020.
7. Osterminski K., Schiebl P. // *Struct. Concrete*. 2012. V. 13. № 3. P. 156-165. DOI: 10.1002/suco.201200003.
8. Кириленко А.М. Диагностика железобетонных конструкций и сооружений. М.: Архитектура С. 2013. 368 с.
9. Romano P., Brito P.S., Rodrigues L. // *Construct. and Build. Mater.* 2013. V. 47. P. 827-832. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.042.

### REFERENCES

1. Bikul'chus G. // *Protect. Metals*. 2005. V. 41. N 5. P. 484-486. DOI: 10.1007/s11124-005-0070-8.
2. James A., Bazarchi E., Chiniforush A.A., Aghdam P.P., Hosseini M.R., Akbarnezhad A., Martek I., Ghodoosi F. // *Construct. Build. Mater.* 2019. V. 224. P. 1026-1039. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.250.
3. Tran N.L., Phan V.P., Valeriy M. // *Architect. and Eng.* 2021. V. 6. N 2. P. 37-44. DOI: 10.23968/2500-0055-2021-6-2-37-44.
4. Guo A., Li H., Ba X., Guan X., Li H. // *Eng. Struct.* 2015. V. 105. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.09.031.
5. Cao Nhat Linh, Nguyen Van Chi, Dong Van Kien, Le Hong Quan, Nong Quoc Quang, Nguyen Duc Anh, Nguyen Thi Hong Xanh, Zyablov A.N. // *Butlerov Commun. A*. 2021. V. 2. N 3. Id. 19. DOI: 10.37952/ROI-jbc-A/21-2-3-19.
6. Borah M.M., Dey A., Sil A. // *Structures*. 2020. V. 23. P. 191-203. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.09.020.
7. Osterminski K., Schiebl P. // *Struct. Concrete*. 2012. V. 13. N 3. P. 156-165. DOI: 10.1002/suco.201200003.
8. Kirilenko A.M. Diagnostics of reinforced concrete structures. M.: Arkhitektura-C. 2013. 368 p. (in Russian).
9. Romano P., Brito P.S., Rodrigues L. // *Construct. and Build. Mater.* 2013. V. 47. P. 827-832. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.042.

10. **Fan L., Shi X.** // *Struct. Health Monitoring*. 2022. V. 21. N 4. P. 1879-1905. DOI: 10.1177/14759217211030911.
11. **Линь К.Н., Чи Н.В., Куанг Н.К., Киен Д.В., Куан Л.Х., Зяблов А.Н., Миненкова И.В.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 6-11. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6520.
12. **Andrade C., Maribona I.R., Feliu S., González J.A., Feliu Jr S.** // *Corrosion Sci.* 1992. V. 33. N 2. P. 237-249. DOI: 10.1016/0010-938X(92)90148-V.
13. **Зарцын И.Д., Шевцов Д.С.** // *Коррозия: материалы, защита*. 2018. № 2. С. 31-40.
14. **Chen L., Su R.K.L.** // *Construct. and Build. Mater.* 2021. V. 267. 121003. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121003.
15. **Shevtsov D.S., Zartsyn I.D., Komarova E.S.** // *Cement Concr. Compos.* 2021. V. 119. 104026. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104026.
16. **Hornbostel K., Angst U.M., Elsener B., Larsen C.K., Geiker M.R.** // *Cement and Concr. Compos.* 2015. V. 76. 147-158. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.05.023.
17. **Шевцов Д.С., Зарцын И.Д., Комарова Е.С.** // *Коррозия: материалы, защита*. 2020. № 5. С. 30-37. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-5-30-37.
18. **Lliso-Ferrando J.R., Gasch I., Martínez-Ibernón A., Valcuende M.** // *Ocean Eng.* 2022. V. 257. 111680. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111680.
19. **Ковалюк Е.Н., Матвиенко М.А.** // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. № 5. С. 16-21.
20. **Li P., Wang Q., Deng G., Guo X., Jiang W., Liu H., Li F., Thanh N.T.K.** // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2017. V. 19. N 36. P. 24742-24751. DOI: 10.1039/C7CP04097K.
10. **Fan L., Shi X.** // *Struct. Health Monitoring*. 2022. V. 21. N 4. P. 1879-1905. DOI: 10.1177/14759217211030911.
11. **Cao Nhat Linh, Nguyen Van Chi, Nong Quoc Quang, Dong Van Kien, Le Hong Quan, Zyablov A.N., Minenkova I.V.** // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 6-11. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6520.
12. **Andrade C., Maribona I.R., Feliu S., González J.A., Feliu Jr S.** // *Corrosion Sci.* 1992. V. 33. N 2. P. 237-249. DOI: 10.1016/0010-938X(92)90148-V.
13. **Zartsyn I.D., Shevtsov D.S.** // *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2018. N 2. P. 31-40 (in Russian).
14. **Chen L., Su R.K.L.** // *Construct. and Build. Mater.* 2021. V. 267. 121003. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121003.
15. **Shevtsov D.S., Zartsyn I.D., Komarova E.S.** // *Cement Concr. Compos.* 2021. V. 119. 104026. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104026.
16. **Hornbostel K., Angst U.M., Elsener B., Larsen C.K., Geiker M.R.** // *Cement Concr. Compos.* 2015. V. 76. P. 147-158. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.05.023.
17. **Shevtsov D.S., Zartsyn I.D., Komarova E.S.** // *Protect. Metals Phys. Chem. Surfaces*. 2021. V. 57. P. 1388-1394. DOI: 10.1134/S2070205121070182.
18. **Lliso-Ferrando J.R., Gasch I., Martínez-Ibernón A., Valcuende M.** // *Ocean Eng.* 2022. V. 257. 111680. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111680.
19. **Kovalyuk E.N., Matvienko M.A.** // *Korroziya: Materialy, Zashchita*. 2013. N 5. P. 16-21 (in Russian).
20. **Li P., Wang Q., Deng G., Guo X., Jiang W., Liu H., Li F., Thanh N.T.K.** // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2017. V. 19. N 36. P. 24742-24751. DOI: 10.1039/C7CP04097K.

Поступила в редакцию 28.04.2023  
Принята к опубликованию 18.05.2023

Received 28.04.2023  
Accepted 18.05.2023