

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ АН-36 В МОРСКОЙ СРЕДЕ ВЬЕТНАМА

Нгуен Ван Чи, Као Ньят Линь, Донг Ван Киен, Ле Хонг Куан, Нонг Куок Куанг, А.Н. Зяблов

Нгуен Ван Чи, Као Ньят Линь *, Донг Ван Киен, Ле Хонг Куан, Нонг Куок Куанг

Приморское отделение, Совместный Российско-Вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр, ул. Нгуен Тхьен Тхуат, 30, Нячанг, Кхань Хоа, Вьетнам, 57127

E-mail: nguyenvanchirvtc@gmail.com, cnlinh0812@gmail.com *

Александр Николаевич Зяблов

Кафедра аналитической химии, Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, Воронеж, Российская Федерация, 394018

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

Создание и усовершенствование методов прогнозирования сроков службы конструкционных сталей в конкретной морской акватории является актуальной задачей для выбора соответствующих мер по защите металлоконструкций от коррозии и обрастания. В настоящей работе показаны возможности применения математических моделей для описания кинетики коррозионного процесса стали АН-36, широко используемой в судостроении во Вьетнаме, на основе данных испытаний в морской воде. Перед проведением экспозиции образцов проводили электрохимические исследования стали АН-36. Показано, что с течением времени происходит резкое смещение потенциала свободной коррозии (Е_{св.кор.}) в более отрицательную область, что свидетельствует о снижении коррозионной стойкости стали. В морской воде стабилизация Е_{св.кор.} наблюдается в течение 60 мин. В ходе изучения поляризационных кривых установлено, что потенциалы и токи коррозии образцов со временем уменьшаются и стремятся к постоянным значениям. После экспозиции образцов в морской воде в естественных и лабораторных условиях в различных режимах рассчитывали показатели коррозионного процесса. Регрессионный анализ полученных данных показал, что адекватной моделью для удельных потерь является модель степенного вида $M(t) = At^k$. Точность моделей характеризуется высоким множественным коэффициентом корреляции. Согласно расчетам, в натуральных условиях на различных глубинах стационарного режима удельные коррозионные потери мало изменяются. Также следует отметить, что коррозия образцов, защищенных от макрообрастателей мелкойячеистым чехлом, происходит не равномерно: сначала медленно, затем ускоряется после достижения определенного значения. По сравнению со стационарным режимом коррозионные процессы в динамическом режиме протекают быстрее с высокими значениями A , k как в лабораторных, так и естественных условиях.

Ключевые слова: скорость коррозии, морская коррозия, регрессионные модели, конструкционная сталь, методы прогнозирования

STUDY ON STRUCTURAL STEEL AH-36 CORROSION IN THE MARINE ENVIRONMENT OF VIETNAM

Nguyen Van Chi, Cao Nhat Linh, Dong Van Kien, Le Hong Quan, Nong Quoc Quang, A.N. Zyablov

Nguyen Van Chi, Cao Nhat Linh *, Dong Van Kien, Le Hong Quan, Nong Quoc Quang

Coastal Branch, Vietnam-Russia Tropical Centre, Nguyen Thien Thuat st., 30, Nha Trang, Khanh Hoa, Vietnam, 57127

E-mail: nguyenvanchirvtc@gmail.com, cnlinh0812@gmail.com*

Alexander N. Zyablov

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

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

The development and improvement of methods for predicting the service life of structural steels in a particular sea area are an urgent task for selection of appropriate measures to protect metal structures from corrosion and fouling. This paper shows the possibilities of using mathematical models to describe kinetics of corrosion process of AH-36 steel, which is widely used in ship-building in Vietnam, based on test data in seawater. Before exposure of samples, electrochemical studies of AH-36 steel were carried out. It is shown that over time there is a sharp shift in free corrosion potential (E_{corr}) to a more negative region, which indicates a decrease in the corrosion resistance of steel. In seawater, stabilization of E_{corr} observed for 60 min. In the course of studying polarization curves, it was found that corrosion potentials and currents of samples decrease with time and tend to constant values. After exposure of samples in seawater under natural and laboratory conditions in various modes, the indicators of corrosion process were calculated. The regression analysis of the obtained data showed that an adequate model for specific mass loss is a power-type model $M(t) = At^k$. The accuracy of models is characterized by a high multiple correlation coefficient. According to calculations in full-scale conditions at different depths of the stationary mode, the specific corrosion losses change little. It should also be noted that the corrosion of samples protected from macro-fouling by a fine-mesh cover does not occur uniformly: at first slowly, then accelerates after reaching a certain value. Compared to the stationary mode, corrosion processes in the dynamic mode proceed faster with high values of A , k both in laboratory and in natural conditions.

Key words: corrosion rate, sea corrosion, regression models, structural steel, forecasting method

Для цитирования:

Нгуен Ван Чи, Као Ньят Линь, Донг Ван Киен, Ле Хонг Куан, Нонг Куок Куанг, Зяблов А.Н. Исследование коррозии конструкционной стали АН-36 в морской среде Вьетнама. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 10. С. 139–144

For citation:

Nguyen Van Chi, Cao Nhat Linh, Dong Van Kien, Le Hong Quan, Nong Quoc Quang, Zyablov A.N. Study on structural steel AH-36 corrosion in the marine environment of Vietnam. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 10. P. 139–144

ВВЕДЕНИЕ

В современном судостроении борьба с коррозией и обрастанием судов занимает важное место. Во время эксплуатации металлические части судов подвергаются коррозии из-за высокой агрессивности морской воды, что уменьшает их срок службы. Кроме того, корпуса судов, находящиеся в воде, обрастают различного рода организмами: бактериями, водорослями, беспозвоночными животными и др., что приводит к росту их массы и, как следствие, увеличению расхода топлива и снижению скорости движения судов. Между коррозией и обрастанием существует тесная связь, их взаимодействие ускоряет повреждение корпуса судна [1-4].

В связи с этим, для выбора соответствующих мер по защите металлоконструкций от коррозии и обрастания возникает необходимость создания и усовершенствования методов прогнозирования их сроков службы в конкретной морской акватории. Математические модели кинетики коррозионных процессов позволяют прогнозировать их

эволюцию во времени и определять сроки достижения критических значений степени коррозионного поражения металла [5, 6].

Моделирование коррозионного процесса металлов в морских средах проводилось различными авторами [7-10] с различными эмпирическими моделями. Однако большинство из них не подтверждается экспериментами по исследованию протекания коррозионных процессов на границе металл/слой биологического оброста, происходящих в тропических водах Вьетнама [11-15].

Цель настоящей работы – разработка математических моделей для описания кинетики коррозионного процесса стали АН-36 на основе данных испытаний в морской воде в естественных и лабораторных условиях в различных режимах.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе проводили исследование коррозионного поведения стали АН-36, широко используемой в судостроении во Вьетнаме, где она выдерживает нагрузку на скалывание и провисание во время плавания. Элементный состав стали АН-36 приведен в табл. 1 [16, 17].

Таблица 1

Элементный состав стали АН-36
Table 1. Elemental composition of AN-36 steel

Элемент, масс. % (остальное Fe)										
C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	P	S	Nb	Ti
≤0,18	≤0,5	≤0,9	≤0,2	≤0,05	≤0,4	≤0,08	≤0,035	≤0,035	≤0,02	≤0,02

В работе использовали пластины стали АН-36, размером 15×10 см. Подготовку поверхности этих образцов перед экспозицией в море осуществляли в соответствии с ГОСТ 9.909-86. Срок нахождения образцов в воде был от 1 до 8 мес. Образцы доставали для анализа один раз в месяц (по 5 образцов на каждый временной отрезок).

Перед проведением испытаний образцов стали АН-36 снимали поляризационные кривые в потенциостатическом режиме, используя трехэлектродную ячейку, Autolab PGSTAT 204N. Электродом сравнения служил хлорид-серебряный электрод, вспомогательным – платиновый, третий электрод – пластина исследуемой стали. Скорость развертки потенциала составляла 1 мВ/с, диапазон развертки от –100 до +100 мВ относительно установившегося значения электродного потенциала. Рабочая площадь исследуемых образцов составляла 1 см² [18, 19]. В качестве коррозионной среды была выбрана морская вода прибрежной зоны г. Нячанг, Вьетнам.

На следующем этапе проводили экспозицию образцов в морскую воду (предварительно отобранную) в лаборатории и в открытое море (естественных условиях), как в стационарных, так и динамических режимах. В стационарном состоянии в лаборатории образцы погружали в емкости объемом 1000 дм³, заполненные морской водой, в открытом море образцы погружали на глубины 0,6, 1,8 и 3,0 м без защиты и с защитой от макрообработателей мелкодисперсным (<100 мкм) чехлом.

Для проведения исследований в динамическом режиме в лаборатории в бассейне создавали равномерный (контролируемый) поток морской воды, омывающей образцы, закрепленные неподвижно. Для исследования свойств образцов стали в открытом море в динамическом режиме образцы перемещали с постоянной скоростью с помощью роторной установки.

Места экспозиции образцов – бухта Дам Бай, Морская испытательная станция на острове Хон Че, г. Нячанг (Вьетнам) [20]. Гидрохимическая характеристика района работ в период испытания образцов представлена в табл. 2.

Определение содержания растворенного кислорода в воде осуществляли с помощью портативного измерителя АМ 40 (Meinsberg, Германия).

Измерение pH осуществляли pH-метром HI 8314 (Hanna Instruments, Италия). Соленость установлена с помощью рефрактометра HI 98319 (Hanna Instruments, Италия).

Таблица 2

Гидрохимические показатели исследуемой акватории в период экспозиции образцов
Table 2. Hydrochemical indicators of the investigated water area during exposure of samples

Глубина, м	Температура, °С	pH	Соленость, %	Концентрация растворенного кислорода, мг/дм ³
0,6	25,1–30,3	8,1–8,4	3,2–3,4	7,51–9,33
1,8	25,9–29,1	8,1–8,4	3,2–3,4	7,52–9,40
3,0	26,1–29,6	8,1–8,4	3,2–3,4	7,43–9,25

Для оценки коррозионных процессов после экспозиции образцы освобождали, в случае необходимости, от биологического обраста. Продукты коррозии удаляли вначале механически мягкими щетками, затем химически дробным травлением по методике ГОСТ 9.907-2007. Удельные потери (средняя потеря массы на единицу площади M (г/м²)) рассчитывали по формуле:

$$M = (m_1 - m_2)/S, (1)$$

где m_1 , m_2 – масса образца до и после испытания соответственно, г; S – площадь образца, м².

Наряду с удельными потерями анализировали среднюю скорость коррозионного процесса K (г/(м²·сут.)), которую определяли по формуле:

$$K = (m_1 - m_2)/St, (2)$$

где t – время экспозиции образца, сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе изучено изменение потенциала свободной коррозии ($E_{св.кор.}$) стали АН-36 в течение 3 ч в морской воде. Показано, что с течением времени происходит резкое смещение потенциала $E_{св.кор.}$ в более отрицательную область, что свидетельствует о снижении коррозионной стойкости стали. В морской воде стабилизация $E_{св.кор.}$ наблюдается в течение 60 мин.

Коррозия данной стали в нейтральных и слабощелочных хлоридсодержащих модельных средах преимущественно протекает с кислородной деполаризацией. С целью исследования кинетики коррозионного процесса стали в морской воде были сняты поляризационные кривые (рис. 1).

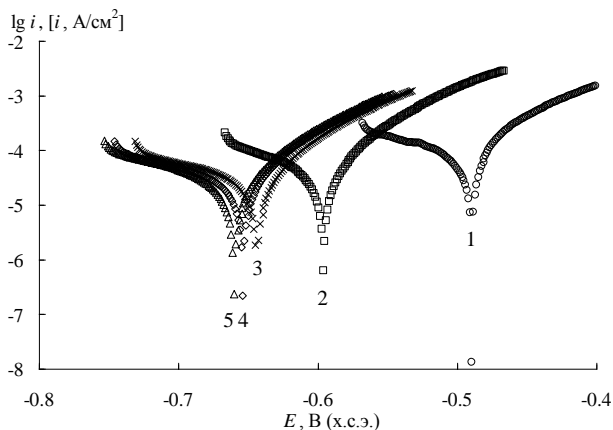


Рис. 1. Поляризационные кривые стали АН-36 в морской воде во времени: 1 – 5 мин; 2 – 10 мин; 3 – 20 мин; 4 – 30 мин; 5 – 40 мин
 Fig. 1. Polarization curves of AN-36 steel in seawater over time: 1 – 5 min; 2 – 10 min; 3 – 20 min; 4 – 30 min; 5 – 40 min

Кинетические параметры коррозионного поведения стали АН-36 в исследуемых средах представлены в табл. 3. Установлено, что коррозионные потенциалы образцов относительно хлорид-серебряного электрода и токи коррозии со временем уменьшаются и стремятся к постоянным значениям. Процесс коррозии в морской воде происходит и достигает стабилизации в течение 20 мин. Анодный коэффициент Тафеля b_a принимает значение в диапазоне 0.1 – 0.2 В, что может указывать на одинаковый механизм анодного процесса.

Таблица 3

Кинетические параметры коррозионного поведения стали АН-36 в исследуемых средах
 Table 3. Kinetic parameters of corrosion behavior of AN-36 steel in studied media

Время	Потенциал коррозии $-E_{корр}$, мВ	Скорость коррозии $i_{корр}$, мкА/см ²	b_a , мВ
5 мин	489,4	21,96	49
10 мин	595,6	9,92	116
20 мин	643,5	7,94	172
30 мин	653,8	7,53	166
40 мин	659,9	7,63	164

После экспозиции образцы обрабатывали по методике ГОСТ 9.907-2007 и рассчитывали показатели коррозионного процесса: удельные потери массы и скорость коррозии. Относительное стандартное отклонение не превышало 10%.

Применение методов регрессионного анализа позволило построить зависимость удельных потерь массы M (г/м²) стали АН-36 от времени контакта с морской водой в естественных и лабораторных условиях (рис. 2). На основании этого предложена модель для оценки удельных потерь M , представляющая собой модель степенного вида $M(t) = At^k$, где A, k – постоянные величины, зависящие от параметров эксплуатационной среды.

Параметр A определяет потери металла за первый месяц экспозиции, k характеризует защитные свойства продуктов коррозии. При этом чем больше A, k , тем больше M .

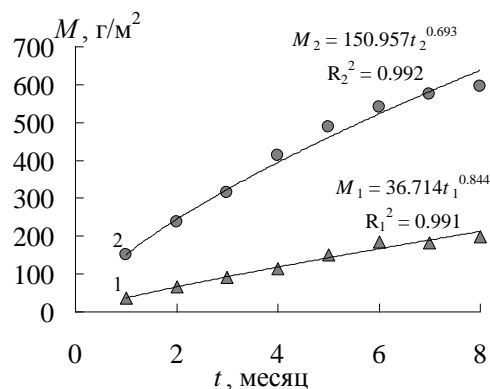


Рис. 2. Кинетика потерь массы конструкционной стали АН-36 в морской воде в лабораторных условиях: 1 – стационарный режим; 2 – динамический режим
 Fig. 2. Mass loss kinetics of AN-36 structural steel in seawater under laboratory conditions: 1 – stationary mode; 2 – dynamic mode

Из рис. 2 видно, что зависимость удельных коррозионных потерь стали от времени хорошо описывается предложенной моделью. Как показано, коррозионный процесс в лабораторных условиях проходит быстрее в динамическом режиме, чем в стационарном. При этом точность моделей характеризуется высоким множественным коэффициентом корреляции R .

С помощью методов регрессионного анализа было приведено исследование коррозионных процессов стали с защитой от макрообрастателей и без нее в естественных условиях в стационарном и динамическом режимах. Результаты приведены в табл. 4 в сравнении с данными лабораторных исследований.

Таблица 4

Модели потери массы и скорости коррозии конструкционной стали АН-36 в морской воде
 Table 4. Models of mass loss and corrosion rate of АН-36 structural steel in seawater

Условия экспозиции образцов	Модель $M(t)$, г/м ²	Модель $K(t)$, г/(м ² ·сут.)	R
Стационарный режим*	$M(t) = 36,71t^{0,84}$	$K(t) = 30,84t^{-0,16}$	0,99
Динамический режим*	$M(t) = 150,96t^{0,69}$	$K(t) = 104,16t^{-0,31}$	0,99
Стационарный режим на глубине 0,6 м**	$M(t) = 220,92t^{0,49}$	$K(t) = 108,25t^{-0,51}$	0,96
Стационарный режим на глубине 1,8 м**	$M(t) = 190,40t^{0,57}$	$K(t) = 108,53t^{-0,43}$	0,96
Стационарный режим на глубине 3,0 м**	$M(t) = 173,25t^{0,66}$	$K(t) = 114,35t^{-0,34}$	0,95
Динамический режим**	$M(t) = 246,97t^{0,63}$	$K(t) = 155,59t^{-0,37}$	0,98
Защищенный режим**	$M(t) = 198,95t^{0,89}$	$K(t) = 177,06t^{-0,11}$	0,98

Примечания: * в лабораторных условиях

** в натуральных условиях

Notes: * in laboratory conditions

** in natural conditions

Как показано в табл. 4, кинетическая модель, описывающая скорость коррозии, имеет вид: $K(t) = Akt^{k-1}$. Скорость коррозии не остается постоянной величиной, она уменьшается по гиперболическому закону с течением времени. $K(t)$ характеризует мгновенную скорость коррозии стали и может применяться для прогнозирования и сравнения образцов с различными сроками экспозиции. Согласно расчетам, в натуральных условиях на различных глубинах стационарного режима удельные коррозионные потери M мало изменяются, в то же время на стали, движущейся в морской среде, коррозионные процессы протекают быстрее с высокими значениями A , k . Также следует отметить, что коррозия образцов, защищенных от макрообраста-

телей мелкоячеистым чехлом, происходит не равномерно: сначала медленно, затем ускоряется после достижения определенного значения.

ВЫВОДЫ

В работе приведены результаты исследований кинетики коррозионных процессов конструкционной стали АН-36 в различных режимах в естественных и лабораторных условиях. Проведено исследование коррозионных процессов с помощью математических моделей. Применение методов регрессионного анализа показало, что адекватной моделью для M является модель степенного вида $M(t) = At^k$. Точность моделей характеризуется высоким множественным коэффициентом корреляции R .

ЛИТЕРАТУРА

1. Бибииков Н.Н., Люблинский Е.Я., Поварова Л.В. Электрохимическая защита морских судов от коррозии. Л.: Судостроение. 1971. 264 с.
2. Карпов В.А., Ковальчук Ю.Л., Харченко У.В., Беленева И.А. Влияние микрообрастания на морскую коррозию металлов и разрушение защитных покрытий. *Коррозия: материалы, защита*. 2011. № 33. С. 11-18.
3. Лаптев А.Б., Перов Н.С., Бухарев Г.М., Кривушина А.А. Коррозия металлов и сплавов в воде Черного моря в присутствии организмов биодеградаторов. *Коррозия: материалы, защита*. 2017. № 10. С. 32-36.
4. Карпов В.А., Ковальчук Ю.Л., Полтаруха О.П., Ильин И.Н. Комплексный подход к защите от морского обрастания и коррозии. М: Товарищество научных изданий КМК. 2007. 156 с.
5. Карпов В.А., Калинина Э.В., Ковальчук Ю.Л. Моделирование морской коррозии в тропических водах Вьетнама. *Коррозия: материалы, защита*. 2020. № 7. С. 9-14. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-7-9-14.
6. Карпов В.А., Лапига А.Г., Калинина Э.В., Михайлова О.Л., Ковальчук Ю.Л. Моделирование атмосферной коррозии в тропическом климате Вьетнама. *Коррозия: материалы, защита*. 2016. № 8. С. 1-10.

REFERENCES

1. Bibikov N.N., Liublinski E.I., Povarova L.V. Electrochemical protection against corrosion of ships. Leningrad: Sudostroenie. 1971. 264 p. (in Russian).
2. Karpov V.A., Kovalchuk Y.L., Kharchenko U.V., Beleneva I.A. Influence of micro-fouling on marine corrosion of metals and destruction of protective coatings. *Corroziya: Materialy, Zashchita*. 2011. N 33. P. 11-18 (in Russian).
3. Laptev A.B., Perov N.S., Bukharev G.M., Krivushina A.A. Corrosion of metals and alloys in the Black Sea water in the presence of biodegradable organisms. *Corroziya: Materialy, Zashchita*. 2017. N 10. P. 32-36 (in Russian).
4. Karpov V.A., Kovalchuk Y.L., Poltaruka O.P., Ilyin I.N. Integrated approach to protection of maritime biofouling and corrosion. Moscow: KMK. 2007. 156 p. (in Russian).
5. Karpov V.A., Kalinina E.V., Kovalchuk Y.L. Modeling of marine corrosion in the tropical waters of Vietnam. *Corroziya: Materialy, Zashchita*. 2020. N 7. P. 9-14 (in Russian). DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-7-9-14.
6. Karpov V.A., Lapiga A.G., Kalinina E.V., Mikhailova O.L., Kovalchuk Y.L. Modeling of atmospheric corrosion in the tropical climate of Vietnam. *Corroziya: Materialy, Zashchita*. 2016. N 8. P. 1-10 (in Russian).

7. **Винокуров Е.Г., Скичко А.С., Мухаметова Г.М., Кожухарь О.Ю., Бурухина Т.Ф., Мешалкин В.П.** Исследование и моделирование процесса подавления биодegradации растворов для химического никелирования. *Вестник Московского государственного технического университета им. НЭ Баумана. Серия «Естественные науки»*. 2020. № 4. С. 103-122. DOI: 10.18698/1812-3368-2020-4-103-122.
8. **Vukelic G., Vizentin G., Brnic J., Brcic M., Sedmak F.** Long-term marine environment exposure effect on butt-welded shipbuilding steel. *J. Marine Sci. Eng.* 2021. V. 9. N 5. P. 491. DOI: 10.3390/jmse9050491.
9. **Alamilla J.L., Espinosa-Medina M.A., Sosa E.** Modelling steel corrosion damage in soil environment. *Corr. Sci.* 2009. V. 51. N 11. P. 2628-2638. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.06.052.
10. **Melchers R.E., Jeffrey R.** The critical involvement of anaerobic bacterial activity in modelling the corrosion behaviour of mild steel in marine environments. *Electrochimica Acta.* 2008. V. 54. N 1. P. 80-85. DOI: 10.1016/j.electacta.2008.02.107.
11. **Ковальчук Ю.Л., Полтаруха О.П., Карпов В.А.** Развитие сообщества макрообращения и динамика коррозии нержавеющей стали 12x18n10t в тропических водах. *Вода: химия и экология*. 2011. № 10. С. 93-98.
12. **Карпов В.А., Полтаруха О.П., Ковальчук Ю.Л.** Изучение развития морского обрастания на медьсодержащих красках и нетоксичных субстратах в тропиках. *Поволжский экологический журнал*. 2002. № 1. С. 28-34.
13. **Харченко У.В., Беленева И.А., Ковальчук Ю.Л., Карпов В.А.** Оценка коррозионной агрессивности морской воды по показателям микробиологической активности сообществ обрастания металлических материалов. *Коррозия: материалы, защита*. 2010. № 12. С. 30-34.
14. **Карпов В.А., Резник Б.П., Ковальчук Ю.Л.** Морская коррозия конструкционных материалов в портовых и относительно чистых водах залива Нячанг (Южно-Китайское море). *Коррозия: материалы, защита*. 2009. № 4. С. 40-43.
15. **Карпов В.А., Полтаруха О.П., Ковальчук Ю.Л.** Исследование динамики коррозии стали 10 в Южно-Китайском море. *Коррозия: материалы, защита*. 2006. № 2. С. 21-24.
16. **Li B.G., Tong X.H., Liu Y., Wang Y.G., Zhu L.S.** Study on corrosion electrochemical behavior of X42 and 16Mn steel in seawater. *Appl. Mech. Mater.* 2013. V. 364. P. 599-602. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.364.599.
17. **Yilmaz A.F., Günay M.** Investigation of mechanical strength and distortion in submerged arc welding of AH36 ship steel plate. *J. Ship Prod. Design.* 2017. V. 33. N 4. P. 335-341. DOI: 10.5957/JSPD.160024.
18. **Меньшиков И.А., Лукьянова Н.В., Шенин А.Б.** Защита стали от коррозии в кислых средах ингибиторами «Солинг» при повышенных температурах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 4. С. 103-110. DOI: 10.6060/ivkkt20186100.5724.
19. **Шенин А.Б., Плотникова М.Д., Рубцов А.Е.** Защитные свойства ряда производных тиadiaзола в растворах серной кислоты. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 7. С. 123-129. DOI: 10.6060/ivkkt.20196207.5968.
20. **Нгуен Ван Чи, Као Ньят Линь, Донг Ван Киен, Ле Хонг Куан, Май Ван Минь, Нонг Куок Куанг, Зяблов А.Н.** Коррозионное поведение стали АН-36 в морской воде. *Бутлеровские сообщения*. 2020. Т. 63. № 9. С. 113-118. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/20-63-9-113.
7. **Vinokurov E.G., Skichko A.S., Mukhametova G.M., Kozhukhar O.Yu., Burukhina T.F., Meshalkin V.P.** Investigation and simulation of biodegradation suppression in electroless nickel plating baths. *Vestnik Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*. 2020. N 4. P. 103-122 (in Russian). DOI: 10.18698/1812-3368-2020-4-103-122.
8. **Vukelic G., Vizentin G., Brnic J., Brcic M., Sedmak F.** Long-term marine environment exposure effect on butt-welded shipbuilding steel. *J. Marine Sci. Eng.* 2021. V. 9. N 5. P. 491. DOI: 10.3390/jmse9050491.
9. **Alamilla J.L., Espinosa-Medina M.A., Sosa E.** Modelling steel corrosion damage in soil environment. *Corr. Sci.* 2009. V. 51. N 11. P. 2628-2638. DOI: 10.1016/j.corsci.2009.06.052.
10. **Melchers R.E., Jeffrey R.** The critical involvement of anaerobic bacterial activity in modelling the corrosion behaviour of mild steel in marine environments. *Electrochimica Acta.* 2008. V. 54. N 1. P. 80-85. DOI: 10.1016/j.electacta.2008.02.107.
11. **Kovalchuk Y.L., Poltaruka O.P., Karpov V.A.** Development of communities in macro-fouling and corrosion dynamics of stainless steel 12x18n10t in tropical waters. *Voda: Khim. Ecol.* 2011. N 10. P. 93-98 (in Russian).
12. **Karpov V.A., Kovalchuk Y.L., Poltaruka O.P.** Investigations of marine fouling development on copper-containing paints and non-toxic substrates in the tropics. *Povolzh. Ekol. Zhurn.* 2002. N 1. P. 28-34 (in Russian).
13. **Kharchenko U.V., Beleneva I.A., Kovalchuk Y.L., Karpov V.A.** Evaluation of the corrosiveness of seawater by indicators of microbiological activity of communities of fouling of metallic materials. *Corroziya: Materialy, Zashchita.* 2010. N 12. P. 30-34 (in Russian).
14. **Karpov V.A., Reznik B.P., Kovalchuk Y.L.** Marine corrosion of structural materials in port and relatively clean waters of Nha Trang Bay (South China Sea). *Corroziya: Materialy, Zashchita.* 2009. N 4. P. 40-43 (in Russian).
15. **Karpov V.A., Poltarukha O.P., Kovalchuk Y.L.** Study of the dynamics of corrosion of steel 10 in the south china sea. protection of metals. *Corroziya: Materialy, Zashchita.* 2006. N 2. P. 21-24 (in Russian).
16. **Li B.G., Tong X.H., Liu Y., Wang Y.G., Zhu L.S.** Study on corrosion electrochemical behavior of X42 and 16Mn steel in seawater. *Appl. Mech. Mater.* 2013. V. 364. P. 599-602. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.364.599.
17. **Yilmaz A.F., Günay M.** Investigation of mechanical strength and distortion in submerged arc welding of AH36 ship steel plate. *J. Ship Product. Design.* 2017. V. 33. N 4. P. 335-341. DOI: 10.5957/JSPD.160024.
18. **Menshikov I.A., Lukyanova N.V., Shein A.B.** Protection of steel from corrosion in acidic media at elevated temperatures by «Soling» series inhibitors. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 4. P. 103-110 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt20186100.5724.
19. **Shein A.B., Plotnikova M.D., Rubtsov A.E.** Protective properties of some thiadiazole derivatives in sulfuric acid solutions. *ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 7. P. 123-129 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20196207.5968.
20. **Nguyen Van Chi, Cao Nhat Linh, Dong Van Kien, Le Hong Quan, Mai Van Minh, Nong Quoc Quang, Zablov A.N.** Corrosion behavior of AH-36 steel in seawater. *Butlerov Communications.* 2020. V. 63. N 9. P. 113-118. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/20-63-9-113.

Поступила в редакцию (Received) 23.08.2021

Принята к опубликованию (Accepted) 13.09.2021