

УДК 620.193.2

Коррозионная агрессивность атмосферы на испытательных станциях Тропического центра Вьетнама.

Ч2. Оценка коррозионной агрессивности атмосферы по отношению к типовым металлам.

Ю.М. Панченко,¹ Т.Н. Игонин,^{1*} Л.Н. Кудрявцева,¹ Т.Т. Чанг,²
Д.Д. Чунг,² Н.В. Тханг,² К.Н. Линь,² М.В. Минь,² Н.Х. Чанг,²
Ф.Н. Ту² и В.В. Хуи²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), 119071, г. Москва, Ленинский проспект. 31, корп.4.

² 63, ул. Нгуен Ван Хуен, р-н. Кау Жай, г. Ханой, СР Вьетнам. Институт Тропического материаловедения / Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр
E-mail: igonintd@gmail.com

Аннотация

Для проведения данной работы были использованы результаты 4-х годовых испытаний типовых металлов ($K^{\text{экс}}$) при установке образцов верхней стороной в 2-х направлениях на трех коррозионных станциях (КС) Вьетнама. С использованием функций доза-ответ ФДОС и ФДОН для КС были определены первогодовые коррозионные потери металлов ($K^{\text{пр}}$). По величинам полученных $K^{\text{пр}}$ даны оценки коррозионной агрессивности атмосфер КС по отношению к типовым металлам. Сопоставления оценочных категорий коррозионной агрессивности с категориями, определенными по экспериментальным величинам $K^{\text{экс}}$, показали достаточно хорошую сопоставимость для стали и цинка с использованием ФДОС и ФДОН. Для меди отсутствует сопоставимость категорий с использованием по обеим моделям, а для алюминия сопоставимость категории получена только с использованием ФДОН. В ФДОН для стали, цинка и меди сделаны подгонки величин температурных коэффициентов для получения абсолютной сопоставимости, оцененных категорий коррозионной агрессивности атмосферы по $K^{\text{пр}}$ с категориями, определенными по $K^{\text{экс}}$. Показано, что подгонка температурных коэффициентов носит частный характер только для КС Вьетнама и требует проверки для применения в других местах.

Ключевые слова: типовые металлы, коррозионные потери, категории коррозионной агрессивности атмосферы, функция доза-ответ.

Поступила в редакцию 13.10.2025 г.; После доработки 13.10.2025 г.; Принята к публикации 13.10.2025 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2025-3-4-35-48](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-4-35-48)

Введение

Для практических целей большое значение имеют сведения о коррозионной агрессивности атмосферы каждого места эксплуатации конструкций/изделий. В соответствии с коррозионной агрессивностью атмосферы определяется толщина металла конструкций, меры их защиты, срок службы и др. Для различных климатических регионов мира, представлена классификация коррозионной агрессивности атмосферы с учетом климатических характеристик, концентраций в воздухе диоксида серы и скорости осаждения хлоридов [1]. Для каждого металла даны 5 категорий коррозионной агрессивности с указанием для каждой категории интервала их коррозионных потерь/поражений (K). Однако информационная классификация не является надежной. Это, прежде всего, обусловлено: чрезвычайно большими территориями с указанными климатическими особенностями, отсутствием четких территориальных границ для каждой категории. Несоответствие величин K по информационной классификации с экспериментальными K отмечено в работах, например [2]. Надежный метод – это определение категорий коррозионной агрессивности по величинам экспериментальных K , полученных годовыми испытаниями в конкретном месте.

Согласно стандарту [1] в каждом месте категория для всех металлов должна быть одинаковой, то есть, по годовым испытаниям одного типа металла можно установить категории для других металлов. Однако испытания, проведенные на коррозионных станциях Вьетнама, свидетельствуют об отсутствии единой категории по отношению к конструкционным металлам в конкретном месте.

Эти несоответствия классификации коррозионной агрессивности атмосферы по отношению к разным металлам приводят к необходимости проводить в каждом месте годовые испытания всех металлов. Испытания металлов являются трудоемкими, затратными по времени и финансам. Оценить величины K , а, следовательно, и категории коррозионной агрессивности атмосферы, можно с использованием математических моделей. По этой причине оправдан интерес к аналитическим и численным моделям оценки коррозионных потерь металлов, а, следовательно, и категорий коррозионной агрессивности, в зависимости от основных факторов атмосферной коррозии. Для территории Вьетнама в настоящее время отсутствуют такие модели.

Для разработки математических моделей для достоверной оценки коррозионных потерь металлов в определенном месте в любом климатическом районе достаточны разовые проведения годовых испытаний. Путем подгонки коэффициентов модели можно достичь положительных результатов, но данная модель или рассчитанные величины коэффициентов, входящих в эту модель, не могут быть использованы для других мест. Разработка моделей для больших территорий возможна только на основе большой базы данных. Для Вьетнама отсутствует большая база данных. Поэтому имеет смысл использовать модели, разработанные на основе данных, полученных во многих регионах мира, а именно, функции доза-ответ (ФДО). К таким моделям можно отнести ФДО, представленные в международном стандарте (далее ФДОС) [2] и ФДО (далее

ФДОН), представленные в работах [3]. Эти модели разработаны на большой базе данных коррозионных испытаний в различных регионах мира по международным программам. ФДОС разработаны по программам ISO CORRAG [4], MICAT [5] и UNECE [6]. ФДОН разработаны по результатам программ MICAT, UN/ECE и российских программ [3, 7, 8].

Целью данной работы является выбор модели из существующих моделей для достоверной оценки категорий коррозионной агрессивности атмосферы на территории Вьетнама.

Методика

Использованы модели ФДОС и ФДОН, разработанные для двух температурных интервалов: $T \leq 10^\circ\text{C}$ и $T > 10^\circ\text{C}$. Учитывая, что температура воздуха на КС Вьетнама выше 10°C , ниже приведены уравнения для данного интервала $T > 10^\circ\text{C}$. ФДОС Уравнение (1) – Уравнение (4):

Для углеродистой стали

$$r_{\text{corr}} = 1,77 \cdot P_d^{0,52} \cdot \exp(0,020 \cdot RH - 0,054 \cdot (T - 10)) + 0,102 \cdot S_d^{0,62} \cdot \exp(0,033 \cdot RH + 0,040 \cdot T) \quad (1)$$

для цинка

$$r_{\text{corr}} = 0,0129 \cdot P_d^{0,44} \cdot \exp(0,046 \cdot RH - 0,071 \cdot (T - 10)) + 0,0175 \cdot S_d^{0,57} \cdot \exp(0,008 \cdot RH + 0,085 \cdot T) \quad (2)$$

для меди

$$r_{\text{corr}} = 0,0053 \cdot P_d^{0,26} \cdot \exp(0,059 \cdot RH - 0,080 \cdot (T - 10)) + 0,01025 \cdot S_d^{0,27} \cdot \exp(0,036 \cdot RH + 0,049 \cdot T) \quad (3)$$

для алюминия

$$r_{\text{corr}} = 0,0042 \cdot P_d^{0,73} \cdot \exp(0,025 \cdot RH - 0,043 \cdot (T - 10)) + 0,0018 \cdot S_d^{0,60} \cdot \exp(0,020 \cdot RH + 0,094 \cdot T) \quad (4)$$

где

r_{corr} – скорость коррозии металла за первый год, мкм/год;

T – среднегодовая температура воздуха, $^\circ\text{C}$;

RH – среднегодовая относительная влажность воздуха, %;

P_d – среднегодовая скорость осаждения SO_2 , $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, с использованием щелочных пластин;

S_d – среднегодовая скорость осаждения Cl^- , $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Отношения между скоростью осаждения SO_2 P_d , $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ и концентрацией SO_2 в воздухе P_c ($\text{мкг}/\text{м}^3$) приближенно выражено как: $P_d = 0,8 P_c$.

Далее r_{corr} в (1)–(4) переводим в $\text{г}/\text{м}^2$ и обозначаем как $K^{\text{пр}}$. Для перевода мкм в $\text{г}/\text{м}^2$ использованы плотности 7,8 $\text{г}/\text{см}^3$: 7,2 $\text{г}/\text{см}^3$: 8,96 $\text{г}/\text{см}^3$ и 2,7 $\text{г}/\text{см}^3$ соответственно для стали, цинка, меди и алюминия. P_d обозначаем в (1)–(4) как $[\text{SO}_2]$, S_d – $[\text{Cl}]$.

ФДОН, Уравнение (5) – Уравнение (8):

для углеродистой стали

$$K^{\text{пр}} = 7,7 \cdot \{ [\text{SO}_2]^{0,47} + 0,68 \cdot [\text{Cl}]^{0,58} \} \cdot \exp(0,024 \cdot RH - 0,065 \cdot (T - 10) + 0,00035 \cdot Prec) \quad (5)$$

для цинка

$$K^{\text{пр}} = 0,45 \cdot \{ [\text{SO}_2]^{0,36} + 0,64 \cdot [\text{Cl}]^{0,51} \} \cdot \exp(0,023 \cdot RH - 0,055 \cdot (T - 10) + 0,00035 \cdot Prec) \quad (6)$$

для меди

$$K^{\text{пр}} = 0,50 \cdot \{ [\text{SO}_2]^{0,38} + 0,61 \cdot [\text{Cl}]^{0,62} \} \cdot \exp(0,025 \cdot RH - 0,055 \cdot (T - 10)) + 0,0003 \cdot Prec \quad (7)$$

для алюминия

$$K^{\text{пр}} = 0,010 \cdot ([\text{SO}_2]^{0,67} + 0,46 \cdot [\text{Cl}]^{0,85}) \cdot \exp(0,039 \cdot RH - 0,065 \cdot (T - 10) - 0,0001 \cdot Prec) \quad (8)$$

где

$Prec$ – суммарное за год количество осадков (мм);

$[\text{SO}_2]$ – среднегодовая концентрация SO_2 в воздухе, мкг/м^3 ;

$[\text{Cl}]$ – среднегодовая скорость осаждения Cl^- , $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, определенная методом влажной свечи. Учитывается соотношение: 1 $[\text{SO}_2]$ мкг/м^3 соответствует 0,8 $[\text{SO}_2]$ $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Параметры агрессивности атмосферы на КС

Для 4-х годовых экспозиций на каждой КС среднегодовые/суммарные за год климатические параметры T , RH , $Prec$ и суммарная солнечная радиация SR , МДж/м^2 , представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Средние и суммарные метеорологические параметры атмосферы за 4 годовые постановки для каждой КИС.

| КС | № постановки | T , °C | RH , % | $Prec$, мм | SR , МДж/м^2 |
|---------|--------------|----------|----------|-------------|-------------------------|
| Хоа Лак | 1 | 24,6 | 89,0 | 3237 | 4337 |
| | 2 | 25,0 | 88,0 | 3051 | 4204 |
| | 3 | 25,9 | 87,9 | 2721 | 4344 |
| | 4 | 25,7 | 87,4 | 1404 | 4198 |
| Кон Зо | 1 | 29,7 | 75,1 | 1953 | 6573 |
| | 2 | 29,9 | 74,8 | 1949 | 5635 |
| | 3 | 30,1 | 75,2 | 1767 | 5765 |
| | 4 | 30,4 | 75,4 | 2259 | 5745 |
| Дам Бай | 1 | 27,2 | 81,0 | 2083 | 7437 |
| | 2 | 26,7 | 79,6 | 1066 | 6769 |
| | 3 | 27,1 | 80,1 | 1035 | 6713 |
| | 4 | 27,1 | 80,0 | 1092 | 6988 |

Среднегодовые величины $[\text{SO}_2]$ и $[\text{Cl}]$ для годовых экспозиций образцов приведены в Таблица 2 и Таблица 3 соответственно. Скорость осаждения хлоридов в Хоа Лак и Кон Зо не определяли, считая эти КС континентальными. Однако исследования, проводимые в ранние годы [9], свидетельствуют о наличии хлоридов в атмосфере Кон Зо, $[\text{Cl}] = 12,2 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$. Поэтому для Кон Зо эта величина $[\text{Cl}]$ в первом приближении принята для всех постановок.

Таблица 2. Скорость осаждения SO_2 , $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ для всех годовых периодов экспозиции образцов на КС

| КС | $[\text{SO}_2]$, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ |
|---------|---|
| Хоа Лак | 2,7 |
| Кон Зо | 11,1 |
| Дам Бай | 2,3 |

Таблица 3. Скорость осаждения хлоридов на влажную свечу ($[\text{Cl}]$, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) для годовых периодов экспозиции образцов в Дам Бай и Кон Зо

| № месяца испытаний | Постановка | | | |
|--------------------|------------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Дам Бай | 17,9 | 19,9 | 22,4 | 28,4 |
| Кон Зо | | 12,2 | | |

Заметим, что неточные аэрохимические данные могут привести к неточным прогнозным величинам коррозионных потерь ($K^{\text{пр}}$).

Коррозионные потери металлов за первый год экспозиции (далее $K^{\text{КС}}$) на КС Вьетнама даны в Таблице 4.

Таблица 4. Первогодовые коррозионные потери металлов, $K^{\text{КС}}$, $\text{г}/\text{м}^2$

| КС | металл | Постановка | | | | | | | |
|---------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
| | | направление | направление | направление | направление | направление | направление | направление | направление |
| | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Хоа Лак | Ст3 | 192,7 | 200,6 | 172,4 | 174,2 | 141,7 | 146,2 | 158,8 | 160,6 |
| КонЗо | | 152,3 | 185,9 | 175,7 | 179 | 145 | 189,4 | 190,4 | 204 |
| Дам Бай | | 166,9 | 178,7 | 197,7 | 205,5 | 201,2 | 216 | 194,8 | 208,5 |
| Хоа Лак | Zn | 13,34 | 12,25 | 13,48 | 14,53 | 10,1 | 9,27 | 10,87 | 11,81 |
| КонЗо | | 11,77 | 12,6 | 12,98 | 13,29 | 9,86 | 9,39 | 11,48 | 11,73 |
| Дам Бай | | 12,44 | 13,1 | 11,19 | 11,81 | 5,92 | 5,71 | 8,82 | 7,85 |
| Хоа Лак | Cu | 17,61 | 17,34 | 20,05 | 20,28 | 18,62 | 17,38 | 17,33 | 16,88 |
| КонЗо | | 24,83 | 24,3 | 27,15 | 25,94 | 35,03 | 32,22 | 33,61 | 33,09 |
| Дам Бай | | 29,33 | 31,02 | 31,63 | 34,51 | 30,93 | 26,42 | 36,13 | 30,03 |
| Хоа Лак | Al | 0,12 | 0,1 | 0,15 | 0,16 | 0,04 | 0,09 | 0,11 | 0,1 |
| КонЗо | | 0,33 | 0,42 | 0,23 | 0,26 | 0,29 | 0,29 | 0,32 | 0,25 |
| Дам Бай | | 0,29 | 0,32 | 0,35 | 0,34 | 0,31 | 0,35 | 0,26 | 0,29 |

Результаты и их обсуждение

Оценка категорий коррозионной агрессивности атмосферы по отношению к металлам

ФДОС и ФДОН разработаны для предсказания первогодовых коррозионных потерь металлов. Согласно стандарта [1] область неопределенности для Ст3, Cu,

Zn составляет от -50% до $+33\%$, а для Al от -100% до $+50\%$. Следовательно, допускается относительная ошибка расчета $K^{пр}$ для каждого металла в указанных пределах. Для оценки категорий коррозионной агрессивности атмосферы (далее категории) совпадение $K^{пр}$ с $K^{экс}$ не обязательно даже в пределах указанных относительных ошибок. Важно, чтобы величина $K^{пр}$ соответствовала той же категории, что и $K^{экс}$. Следовательно, оценка категорий атмосферы может быть достоверной даже в случае несоответствия $K^{пр}$ с $K^{экс}$.

Сравнительная оценка $K^{пр}$ с $K^{экс}$ представлена на графиках (Рисунок 1) с координатами $y = K^{пр}$, $x = K^{экс}$. При достоверном прогнозе точки с координатами ($K^{экс}$; $K^{пр}$) должны находиться на линии $K^{пр} = K^{экс}$ или между линиями относительных ошибок $K^{пр}$. Сопоставление категории для каждого металла также представлено графически. На координатном поле графиков изображены квадраты соответствия категорий, определенных по $K^{экс}$ и оцененных по $K^{пр}$. При совпадении категорий точки ($K^{экс}$; $K^{пр}$) должны располагаться в квадратах. На границе категорий невозможно добиться точного совпадения категорий. В этом случае желательно совпадение $K^{пр}$ с $K^{экс}$ в пределах указанных относительных ошибок. Эта методика сопоставлений $K^{пр}$ с $K^{экс}$ и категорий реализована в работах [10, 11].

При настоящих испытаниях было проведено 4 одногодových постановок образцов с началом в разные сезоны года, при разных ориентациях образцов. Полученные величины $K^{экс}$ имеет существенный интервал значений (Таблица 3), соответствующих даже 2-м категориям: сталь – С2 и С3, медь – С4 и С5. При одинаковых аэрохимических параметрах для всех годовых постановок на каждой КС возможен неточный прогноз $K^{пр}$.

Прогноз $K^{пр}$ по ФДОС представлен на Рисунке 1а. Полученные результаты свидетельствуют:

Для Ст3 в Кон Зо и Дам Бай категории коррозионной агрессивности по $K^{пр}$ совпадают с категорией по $K^{экс}$ (С3) лишь для некоторых постановок, при этом все $K^{пр}$ с достаточной точностью соответствуют $K^{экс}$ при переходе из категории С2 в категорию С3. Для Хоа Лак значения $K^{пр}$ существенно ниже допустимых значений, но категории для всех постановок по $K^{пр}$ совпадает с категорией по $K^{экс}$, кроме одной постановки. **Для цинка** в Кон Зо для всех постановок, а в Дам Бай лишь для ряда постановок наблюдается совпадение категорий по $K^{пр}$ и по $K^{экс}$. (категория С3) и совпадение $K^{пр}$ с $K^{экс}$ в пределах допустимых ошибок. Для Хоа Лак категории по $K^{пр}$ (С2) не совпадает с категорией по $K^{экс}$ (С3) при всех постановках и $K^{пр}$ существенно меньше $K^{экс}$. **Для меди** для всех КС отсутствуют совпадения категорий и $K^{пр}$ существенно меньше $K^{экс}$. **Для алюминия** $K^{пр}$ совпадает с $K^{экс}$ по величине и по категории (С2) только в Хоа Лак. Для Кон Зо и Дам Бая $K^{пр}$ существенно больше $K^{экс}$. Категории по $K^{пр}$ С3 для Кон Зо и С3 и С4 для Дам Бай вместо С2 по $K^{экс}$.

Таким образом, прогноз $K^{пр}$ по ФДОС удовлетворительный только для стали и для цинка в Кон Зо и Дам Бай. Для меди и алюминия для всех КС неудовлетворительный как по соответствию $K^{пр}$ с $K^{экс}$, так и по сопоставлению категорий коррозионной агрессивности. Исключение прогноз алюминия в Хоа

Лак.

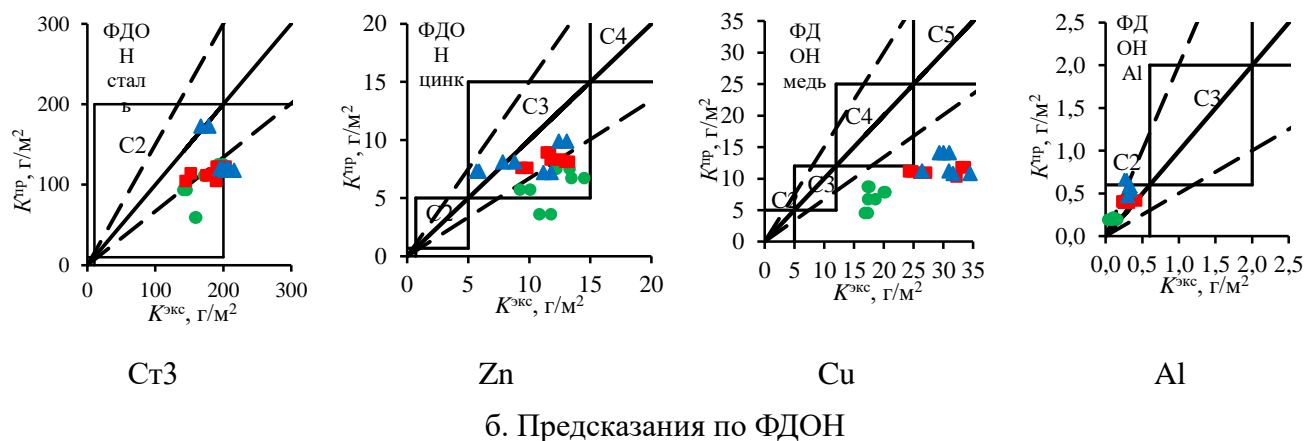
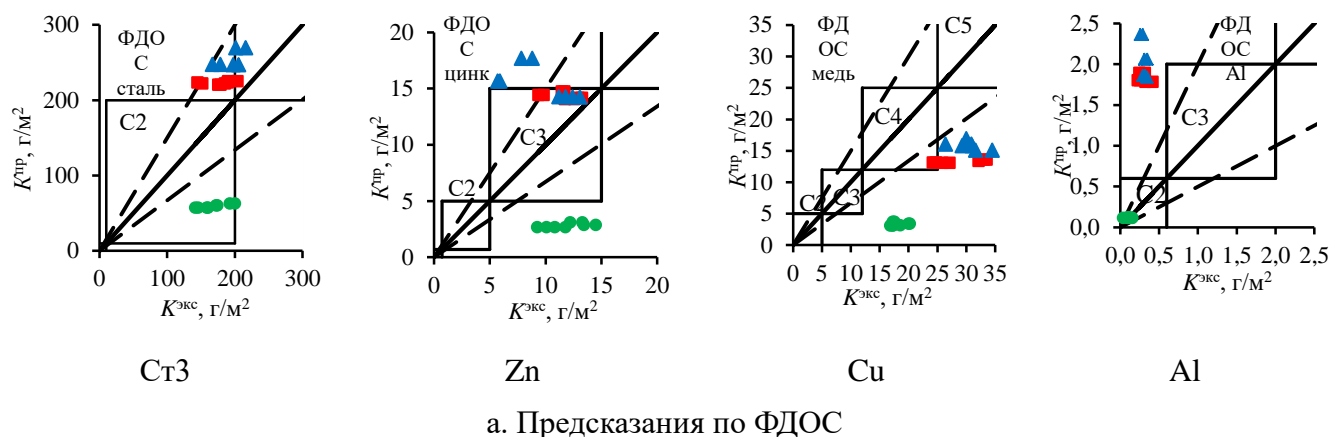


Рисунок 1. Сопоставление категорий по K^{np} , рассчитанных по ФДОС (а) и ФДОН (б), с категориями, определенными по $K^{экс}$, для Хоа Лак (●), Кон Зо (■) и Дам Бай (▲). Линия $K^{np} = K^{экс}$ (—) и линии относительных ошибок (---) для стали, меди, цинка от -50% до 33%, для алюминия -50% до +100%.

Прогноз по ФДОН представлен на Рисунке 1б. Согласно полученным результатам можно сделать следующие выводы:

Для стали на всех КС категория коррозионной агрессивности по K^{np} , как и по $K^{экс}$ – С2, хотя почти все значения K^{np} соответствуют нижней границе допустимой ошибки. Для цинка как для стали для всех КС категории по K^{np} соответствуют категории по $K^{экс}$, категория С3. Исключение для 2-х постановок в Хоа Лак, категория по K^{np} – С2 вместо С3. При этом практически все K^{np} соответствуют или ниже нижней границы допустимой ошибки. Для меди все K^{np} ниже допустимого предела и заниженные категории по K^{np} . Для алюминия для всех КС хорошее совпадение K^{np} с $K^{экс}$ и категорий С2.

Показано, что прогноз K^{np} по ФДОН можно считать удовлетворительным для алюминия, в первом приближении удовлетворительным для стали и цинка – обеспечивает совпадение категорий коррозионной агрессивности. Для меди прогноз по ФДОН неудовлетворительный.

Полученные результаты свидетельствуют, что выбор модели затруднительный. Для обеспечения совпадения K^{np} с $K^{экс}$ в пределах допустимых относительных ошибок приоритетными для стали и меди являются ФДОС. Но для

обеспечения совпадения категорий по $K^{\text{пр}}$ с категориями по $K^{\text{экс}}$ приоритетными для металлов, кроме меди, являются ФДОН.

Оценка категорий коррозионной агрессивности атмосферы по отношению к металлам по результатам испытаний в ранние годы

Для дополнительной проверки приоритетности ФДО воспользуемся результатами исследований, проведенных на территории Вьетнама в ранние годы [9, 12–14]. В Таблице 5 приведены параметры агрессивности атмосферы и коррозионные потери стали, цинка и меди. В работе [12] для Дам Бай отсутствовали данные $[\text{SO}_2]$, для расчетов принято $[\text{SO}_2] = 1 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, а для $[\text{Cl}]$ дан интервал значений, условно принято среднее значение $[\text{Cl}] = 70 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

Таблица 5. Параметры агрессивности атмосферы и коррозионные потери металлов в районах Вьетнама.

| Ссылк а | Место испытания | T , °C | RH , % | $Prec$, мм | $[\text{SO}_2]$, мг/м ² ·сут | $[\text{Cl}]$, мг/(м ² ·сут) | | $K^{\text{экс}}$, г/м ² | | |
|------------|--------------------|-------------|-------------|----------------|---|---|---------------|-------------------------------------|-------|-------|
| | | | | | | полот но | свеча | стал ь | цинк | медь |
| [12] | Ханой | 24,1 | 75,4 | 1692 | 3 | – | – | 327,7 | 4,5 | 10,3 |
| | Хоа Лак | 24,5 | 79,4 | 1716 | 5,2 | – | 9,7 | 216 | 10,3 | 13,6 |
| | Дам Бай | 27,4 | 82,5 | 1099 | * | – | 90– 56,6** | 401 | 33 | 16,4 |
| [9] | Кон Зо | 28 | 79,9 | 2024 | 5,58 | – | 12,2 | 161 | 10,5 | 7,2 |
| [13] | Ханой | 23,9 | 82,7 | 1852 | 2,7 | 0,15 | – | 180,5 | 6,48 | 7,53 |
| | Нячанг | 26,6 | 78,9 | 1127 | 2,9 | 5,76 | – | 408,0 | 22,18 | 34,76 |
| | Хошимин | 27,0 | 78,9 | 1987 | 4,7 | 0,86 | – | 184,6 | 7,06 | 7,08 |
| [14] | Досон | 24 | 85,5 | 1406 | 2,80 | – | 17,51 | 277,6 | – | – |
| | Ханой | 24,1 | 79 | 1579 | 7,95 | – | 2,24 | 247,8 | – | – |
| | Дананг | 25,8 | 83,5 | 2732 | 3,83 | – | 4,99 | 262,6 | – | – |
| | Нячанг | 26,7 | 80,6 | 1728 | 1,34 | – | 13,8 | 316,3 | – | – |
| | Хошимин | 25,8 | 79,3 | 2850 | 12,63 | – | 4,58 | 189,1 | – | – |
| | Вунгтау | 27,4 | 77,7 | 1575 | 3,23 | – | 16,5 | 204,2 | – | – |

* Принято, равным 1,

** – принято 70 мг/(м²·сут)

Результаты сопоставлений категорий по $K^{\text{пр}}$ и по $K^{\text{экс}}$ представлены на Рисунке 2.

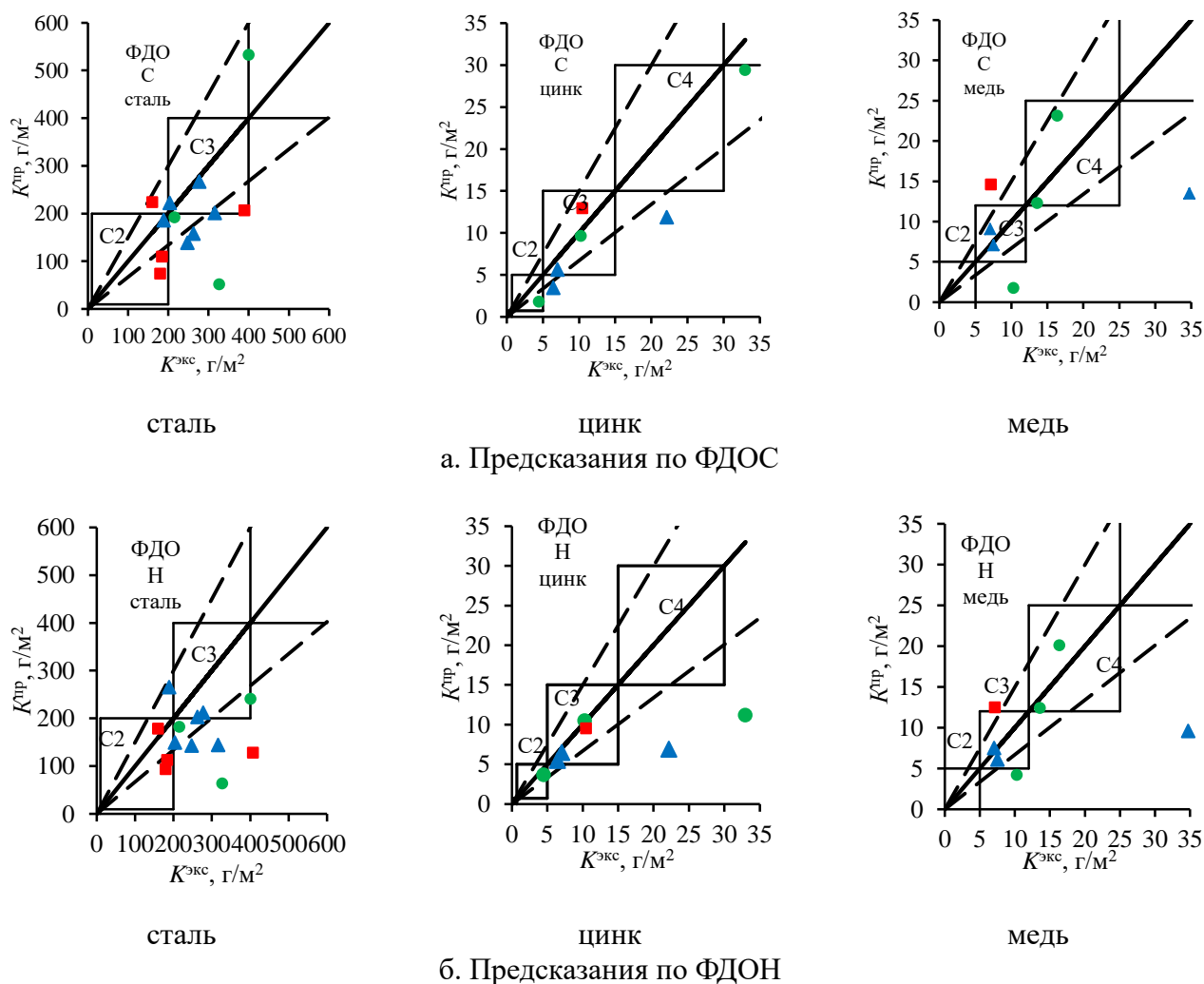


Рисунок 2. Сопоставление категорий по K^{np} , рассчитанных по ФДОС (а) и ФДОН (б), с категориями, определенными по $K^{экс}$, по результатам работ для стали: [12] (●), [9, 13] (■) и [14] (▲); для цинка и меди: [12] (●), [9] (■) и [13] (▲). Линия $K^{np} = K^{экс}$ (—) и линии относительных ошибок (---) для стали, меди, цинка от –50% до 33%, для алюминия –50% до +100%.

Результаты свидетельствуют, что величины K^{np} , определенные по ФДОС и ФДОН, в первом приближении имеют практически одинаковую сопоставимость с $K^{экс}$ и одинаковую оценку категорий по ним. Для цинка и меди существенное отличие для высоких величин $K^{экс}$. Приоритетность какой-либо модели трудно определить.

Возможные причины существенного несоответствия K^{np} с $K^{экс}$ могут быть связаны, прежде всего, с неточными аэрохимическими параметрами атмосферы.

Необходимо также иметь в виду, что на КС Вьетнама температура и относительная влажность воздуха и солнечная радиация соответствуют высоким показателям даже для тропического пояса. При этом температура и солнечная радиация за последние годы увеличились. Высокая температура (Кон Зо – 30,4°C), высокая относительная влажность (Хоа Лак, 89%), высокая солнечная радиация (Дам Бай, 7437 МДж/м²) могут оказать существенное влияние на коррозию, прежде всего, цинка и меди, для которых наблюдается наибольшая

недостоверность $K^{\text{пр}}$. Возможно синергетическое действие этих факторов на коррозию металлов, которое до настоящего времени не изучено.

Корректировка температурных коэффициентов в ФДОН

Ввиду невозможности создания новых моделей с учетом синергетического действия в условиях высокой солнечной радиации и относительной влажности воздуха, можно сделать подгонку коэффициентов, например, в ФДОН.

ФДОН разрабатывалось с учетом большого числа мест с среднегодовой $T \leq 10^\circ\text{C}$. Поэтому для достижения большей достоверности прогноза для мест с высокой температурой необходимо пересмотреть температурный коэффициент в ФДОН для стали, цинка и меди. Для алюминия температурный коэффициент оставить без изменения.

Используя различные варианты величин температурных коэффициентов в ФДОН для всех металлов, получили значения, обеспечивающие наиболее достоверные $K^{\text{пр}}$. Произведена замена величин температурных коэффициентов в соответствии с Таблицей 6.

Таблица 6. Величины температурных коэффициентов в ФДОН прежние и новые

| Металл | Прежний | Новый |
|----------|---------|--------|
| сталь | –0,065 | –0,052 |
| цинк | –0,055 | –0,035 |
| медь | –0,055 | –0,001 |
| алюминий | –0,065 | –0,065 |

Результаты прогноза $K^{\text{пр}}$ с новыми температурными коэффициентами для стали, цинка и меди представлены на Рисунке 3. Получены достоверные оценки категорий коррозионной агрессивности атмосферы, а также сопоставимые $K^{\text{пр}}$ с $K^{\text{экс}}$ в интервалах относительных ошибок.

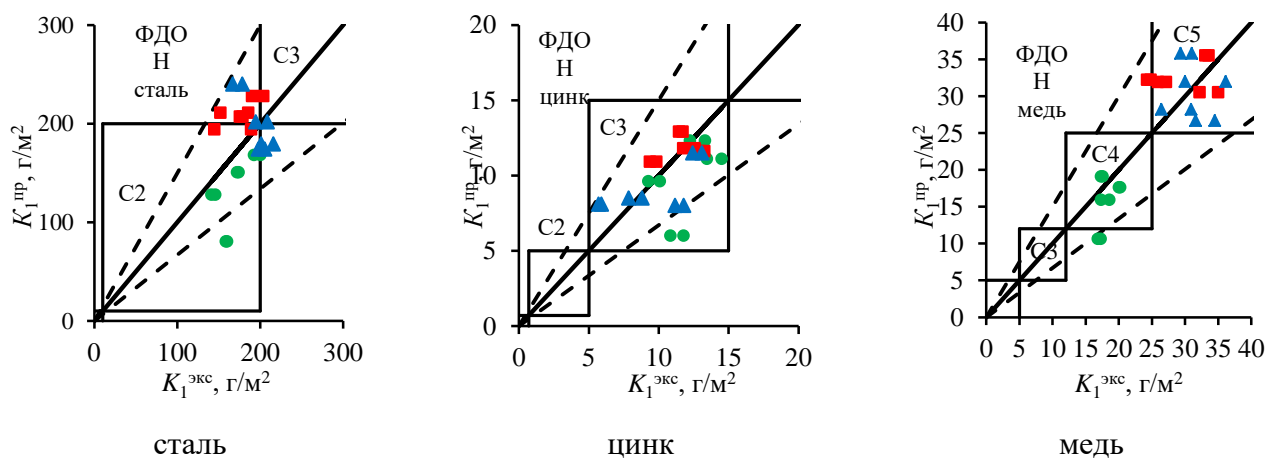


Рисунок 3. Сопоставление $K^{\text{пр}}$ с $K^{\text{экс}}$ и категорий по $K^{\text{пр}}$, рассчитанных по ФДОН (с измененными коэффициентами), с категориями, определенными по $K^{\text{экс}}$, для Хоа Лак (●), Кон Зо (■) и Дам Бай (▲). Линия $K^{\text{пр}} = K^{\text{экс}}$ (—) и линии относительных ошибок (---) для стали, меди, цинка от –50% до 33%.

ФДОН для всех металлов с измененными температурными коэффициентами

для стали, цинка и меди могут быть рекомендованы для тропического климата Вьетнама. Однако они требуют дополнительной тщательной проверки при получении качественных фактических метеорологических и аэрохимических параметров агрессивности атмосферы.

ФДОН с измененными температурными коэффициентами для мест с среднегодовой $T > 10^\circ\text{C}$ представлены в виде Уравнение (9) – Уравнение (12):

Для стали

$$K = 7,7 \cdot \{ [\text{SO}_2]^{0,47} + 0,68 \cdot [\text{Cl}]^{0,58} \} \cdot \exp(0,024 \cdot RH - 0,052 \cdot (T - 10) + 0,00035 \cdot Prec) \quad (9)$$

Для цинка

$$K = 0,45 \cdot \{ [\text{SO}_2]^{0,36} + 0,64 \cdot [\text{Cl}]^{0,51} \} \cdot \exp(0,023 \cdot RH - 0,035 \cdot (T - 10) + 0,00035 \cdot Prec) \quad (10)$$

Для меди

$$K = 0,50 \cdot \{ [\text{SO}_2]^{0,38} + 0,61 \cdot [\text{Cl}]^{0,62} \} \cdot \exp(0,025 \cdot RH - 0,001 \cdot (T - 10) + 0,0003 \cdot Prec) \quad (11)$$

Для алюминия

$$K = 0,010 \cdot ([\text{SO}_2]^{0,67} + 0,46 \cdot [\text{Cl}]^{0,85}) \cdot \exp(0,039 \cdot RH - 0,065 \cdot (T - 10) - 0,0001 \cdot Prec) \quad (12)$$

Коэффициенты для параметров агрессивности атмосферы имеют разные знаки.

Для **RH** для всех металлов коэффициент положительный. Это свидетельствует об увеличении коррозии с повышением относительной влажности.

Температурный коэффициент для всех металлов отрицательный. Это свидетельствует об уменьшении коррозии за счет сокращения пребывания пленки влаги на металлах за счет нагрева поверхности металла.

Коэффициент при *Prec* положительный для стали, цинка, и меди, что сказывается на увеличении коррозии. Это возможно связано с увеличением продолжительности нахождения пленки влаги на металлах, а также с моющим эффектом для продуктов коррозии, при механическом удалении которых коррозия увеличивается. Для алюминия коэффициент отрицательный, что связано с моющим эффектом металлической поверхности, что способствует отсутствию очагов питтинговой коррозии.

Выводы

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Для КС Вьетнама даны сопоставления категорий коррозионной агрессивности атмосферы по $K^{\text{тп}}$, рассчитанных с использованием ФДОС и ФДОН, с категориями, определенными по $K^{\text{экс}}$. Для стали и цинка получены близкие результаты с использованием ФДОС и ФДОН, лишь незначительно лучшие при использовании ФДОН. ФДОС и ФДОН не дают достоверного прогноза категорий агрессивности по отношению к меди. Для алюминия сопоставление категорий получено для всех КС только с использованием ФДОН.
2. На основе поправок температурного коэффициента в ФДОН для КС Вьетнама с

среднегодовой температурой воздуха выше 10°C получены ФДО, позволяющие прогнозировать коррозионные потери типовых металлов и категории коррозионной агрессивности атмосферы с достаточной достоверностью.

Литература

1. ISO 9223:2012(E). *Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation*, International Standards Organization, Geneve, 2012.
2. B. Marteinsson and J. Sigurjónsson, The Icelandic Building Research Institute Keldnaholt Iceland, Corrosion of Metals – Mapping of The Environment In Iceland. 9DBMC-2002, Paper 029.
3. Yu.M. Panchenko, A.I. Marshakov, L.N. Nikolaeva and T.N. Igonin, Development of models for the prediction of first-year corrosion losses of standard metals for territories with a coastal atmosphere in various climatic regions of the world, *Corros. Eng., Sci. Technol.*, 2020, **55**, no. 8, 655–669. doi: [10.1080/1478422X.2020.1772535](https://doi.org/10.1080/1478422X.2020.1772535)
4. J. Tidblad, V. Kucera, A.A. Mikhailov, J. Henriksen, K. Kreislova, T. Yaites, B. Stöckle and M. Schreiner, Final Dose-Response functional froms the UN ECE Project jn Effects of Acid Deposition after 8 Years of Exposure. *14th International Corrosion Congress “Co-operation in Corrosion Control”*. CD Proceedings. Cape Town. South Africa. September 1999.
5. M. Morcillo, Atmospheric corrosion in Ibero-America. The MICAT project. In *Atmospheric Corrosion*; Kirk, W.W., Lawson, H.H., Eds.; ASTM STP 1239; American Society for Testing and Materials: Philadelphia, PA, USA, 1995, 257–275
6. J. Tidblad, A.A. Mikhailov and V. Kucera, Acid Deposition Effects on Materials in Subtropical and Tropical Climates. Data Compilation and Temperate Climate Comparison; *KI Report 2000:8E*; Swedish Corrosion Institute: Stockholm, Sweden, 2000; 1–34.
7. Ю.М. Панченко, Л.А. Шувахина и Ю.Н. Михайловский, Атмосферная коррозия металлов в районах Дальнего Востока, *Защита металлов*, 1982, **18**, № 4, 575–582.
8. М.Г. Абрамова, Ю.М. Панченко, Е.Ю. Ветрова и Т.А. Ненашева, Коррозионная агрессивность атмосферы в различных климатических районах РФ, *Коррозия: материалы, защита*, 2020. № 3, 12–22 doi: [10.31044/1813-7016-2020-0-3-12-22](https://doi.org/10.31044/1813-7016-2020-0-3-12-22)
9. Н.Г. Ануфриев и Ю.А. Кузенков, Коррозивность тропической атмосферы Южного Вьетнама, *Практика Противокоррозионной Защиты*, 2022. **27**, № 4, 7–18. doi: [10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-1](https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2022.106.4-1)
10. Yu.M. Panchenko, A.I. Marshakov, T.N. Igonin, T.A. Nenasheva, L.A. Nikolaeva and A.A. Ivanenko, Corrosion Resistance of Zinc and Zinc-Aluminum-Magnesium Coatings in Atmosphere on the Territory of Russia, *Mater.*, 2023, **16**, 5214. doi: [10.3390/ma16155214](https://doi.org/10.3390/ma16155214)

-
11. Yu.M. Panchenko, A.I. Marshakov, L.A. Nikolaeva and T.N. Igonin, Corrosion resistance of structural metals depending on the sample orientation and initial exposure conditions in coastal and rural atmospheres. Part 1. Corrosivity toward structural metals at coastal and rural test sites under various exposure conditions, *Corros. Eng., Sci. Technol.*, 2023, **58**, no. 7, 645–658. doi: [10.1080/1478422X.2023.2245642](https://doi.org/10.1080/1478422X.2023.2245642)
 12. В.А. Карпов, В.Н. Ивонин, Т.М. Тиен, О.Л. Михайлова, Ю.Л. Ковальчук, Ф.З. Нам и Х.Х. Шон, Определение коррозивности атмосферы на испытательных станциях Тропического центра и в некоторых районах Вьетнама, *Коррозия: материалы, защита*, 2014, № 9, 1–7.
 13. В.Д. Вуй, П.В. Стрекалов, Ю.Н. Михайловский, Д.Т. Бинь и А.А. Михайлов, Коррозионная стойкость сталей, цинка, меди, алюминия и сплавов во влажных тропиках Вьетнама. Результаты пятилетних испытаний, *Защита металлов*, 1994, **30**, №5, 502–509.
 14. L.T.H. Lien, P.T. San and H.L. Hong, Results of studying atmospheric corrosion in Vietnam 1995–2005, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2007, **8**, 552–558. doi: [10.1016/j.stam.2007.08.011](https://doi.org/10.1016/j.stam.2007.08.011)

Corrosivity of the atmosphere on corrosion test stations of Vietnam tropical center. Part 2. Evaluation of atmospheric corrosivity towards typical metals

Yu.M. Panchenko,¹ T.N. Igonin,^{1*} L.N. Kudryavtseva,¹ T.T. Trang,²
D.D. Trung,² N.V. Thang,² C.N. Linh,² M.V. Minh,² N. H. Trang,²
P.N. Tu² and V.V. Huy²

¹ *Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences (IPCE RAS).: 31-4, Leninsky prospect, 119071 Moscow, Russia.*

² *63 Nguyen Van Huyen Street - Nghia Do Ward - Cau Giay District - Hanoi City, Vietnam. Institute of Tropical Durability/ Joint Vietnam-Russian Tropical science and Technology research center
e-mail:*

Abstract

The results of four-year tests of typical metals (K^{exp}) with specimens exposed top side up in two directions at three corrosion stations (CS) in Vietnam were used. Using the dose-response functions FDOS and FDON for CS, the first-year corrosion losses of metals (K^{pr}) were determined. The obtained K^{pr} values were used to estimate the corrosivity of CS atmospheres with respect to typical metals. Comparisons of the estimated corrosivity categories with experimental K^{exp} values demonstrated fairly good comparability for steel and zinc using FDOS and FDON. For copper there is no comparability between the categories using both models, and for aluminum, category comparability was obtained only using FDON. In steel, zinc, and copper FDON adjustments were made to the temperature coefficients to achieve the absolute comparability between the estimated atmospheric corrosivity categories based on K^{pr} with categories determined using K^{exp} . It is shown that the adjustments of temperature coefficients is of a private nature only for the Vietnam CS and requires verification for application in other places.

Keywords: *typical metals, corrosion losses, atmospheric corrosivity categories, dose-response function.*