

Научная статья
УДК 621.876.32
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-662-671>
EDN: NRBMVA



РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПЕРИОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭСКАЛАТОРОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

В.Н. Дятлов¹ ✉, **Д.П. Кононов²**

¹Великолукский филиал ПГУПС,
г. Великие Луки, Россия

²Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I,
г. Санкт-Петербург, Россия

✉ ответственный автор
w.dyatlov@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Введение. Основным элементом эскалатора метрополитена является опорная металлоконструкция, на которую устанавливаются все элементы, узлы и агрегаты, обеспечивающие его функционирование в качестве грузоподъемной машины непрерывного действия. Опорная металлоконструкция должна выдерживать не только собственный вес и суммарный вес прикреплённых к ней узлов и механизмов, но и обеспечивать стойкость к динамическим нагрузкам, возникающим в процессе их работы. Осуществление всесторонних диагностических мероприятий, направленных на анализ уровня износа и определение остаточного ресурса металлоконструкций эскалаторов, наталкивается на ряд сложностей, связанных с высокими требованиями к временным, материальным и финансовым затратам, а также с нарушением работы общественной транспортной системы.

Основная цель, стоящая перед данным исследованием, состоит в том, чтобы оптимизировать сроки для фиксации исходных данных, получаемых в ходе диагностического обследования металлоконструкций эскалаторов при очевидном уменьшении продолжительности их вынужденных простоев.

Материалы и методы. При написании статьи применялись данные комплексного обследования эскалаторов на базе ГУП «Петербургский метрополитен» в количестве 218 шт. в период с 2005 по 2019 г., а также конструкторская документация, статистические методы и методы математического моделирования.

Результаты. Использование математической модели и принципа рационализации позволяет существенно сократить временные и, следовательно, иные затраты при определении коррозионного эффекта.

Заключение. Применение предлагаемого подхода к рациональному распределению периодов времени для проведения диагностических обследований эксплуатируемых металлоконструкций эскалаторов приводит к превентивному получению итоговой прогнозной оценки величины коррозионного эффекта при сокращении общего срока проведения контрольных мероприятий на 38%. Принцип рационализации может быть употреблен также при осуществлении ускоренных испытаний на коррозионную стойкость материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метрополитен, эскалатор, опорная металлоконструкция, коррозионный эффект, математическое моделирование, принцип рационализации

Статья поступила в редакцию 30.07.2024; одобрена после рецензирования 23.09.2024; принята к публикации 17.10.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Дятлов В.Н., Кононов Д.П. Рационализация периодов проведения диагностических обследований элементов металлоконструкций эскалаторов метрополитена // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 662-671. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-662-671>

© Дятлов В.Н., Кононов Д.П., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-662-671>

EDN: NRBMVA

RATIONALIZATION OF DIAGNOSTIC EXAMINATION PERIODS FOR METALWORK ELEMENTS OF SUBWAY ESCALATORS

V.N. Dyatlov¹ ✉, D.P. Kononov²

¹Velikiye Luki branch of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(Velikiye Luki branch PGUPS),
Velikiye Luki, Russian

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University,
St. Petersburg, Russian
w.dyatlov@gmail.com

✉ corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The main element of the subway escalator is a supporting metal structure, on which all elements, components and assemblies are installed, ensuring its functioning as a continuous lifting machine. The supporting metal structure must withstand not only its own weight and the total weight of the components and mechanisms attached to it, but also provide resistance to dynamic loads arising during their operation. The implementation of comprehensive diagnostic measures aimed at analyzing the level of wear and determining the residual life of escalator metal structures encounters a number of difficulties associated with high demands on time, material and financial costs, as well as disruption of the public transport system.

The main goal of this study is to optimize the timing for recording the initial data obtained during the diagnostic examination of escalator metal structures with an obvious reduction in the duration of their forced downtime.

Materials and methods. During the research process, data from a comprehensive survey of escalators based on the State Unitary Enterprise "St. Petersburg Metro" in the amount of 218 pieces in the period from 2005 to 2019 were used, design documentation, statistical methods and mathematical modeling methods were used.

Results. The use of a mathematical model and the principle of rationalization can significantly reduce the time and, consequently, other costs in determining the corrosion effect.

Conclusion. The use of the proposed approach to the rational allocation of time periods for conducting diagnostic examinations of operated escalator metal structures facilitates the preventive final forecast estimate of the magnitude of the corrosion effect while reducing the total period of control measures by 38%. The principle of rationalization can also be used in the implementation of accelerated tests for corrosion resistance of materials.

KEYWORDS: subway, escalator, supporting metal structure, corrosion effect, mathematical modeling, rationalization principle

The article was submitted 30.07.2024; approved after reviewing 23.09.2024; accepted for publication 17.10.2024.

All Authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Dyatlov V.N., Kononov D.P. Rationalization of diagnostic examinations periods for metalwork elements of subway escalators. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 662-671. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-662-671>

© Dyatlov V.N., Kononov D.P., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Эскалаторы, функционирующие в метрополитене, представляют собой мощную металлическую каркасную структуру, устанавливаемую на фундаменты тоннеля или перекрытия, которая, в свою очередь, выступает в качестве основы для всех последующих элементов, узлов и агрегатов. Изготовление металлоконструкций эскалаторов осуществляется с помощью специализированных производственных процессов, с применением профилированной и листовой стали¹. Для эскалаторов российского производства характерно применение стальных марок СтЗсп и СтЗпс².

Опорная металлоконструкция выполняет важнейшую функцию, так как является ключевым элементом функционирования всего эскалатора³. К ней крепятся все необходимые агрегаты – двигатели, тяговые цепи, поручни и прочие механизмы. Именно опорная металлоконструкция должна выдерживать не только собственный вес и суммарный вес прикреплённых к ней узлов и механизмов, но и обеспечивать стойкость к динамическим нагрузкам, возникающим в процессе их работы [1, 2]. Стабильность металлоконструкции обеспечивает безопасность и эффективную функциональность всей системы, называемой эскалатор [3, 4].

Опорные металлоконструкции в силу особенностей их конструктивного исполнения и монтажа при проведении различных ремонтов⁴ практически всегда остаются на своих местах в течение всего периода эксплуатации, заменяются в основном вышедшие из строя агрегаты и механизмы, обеспечивающие функционирование эскалатора [1, 2, 5, 6].

Для определения и оценки индивидуального ресурса лимитирующих элементов общей металлоконструкции эскалатора используется комплексная методология, которая интегрирует как разрушающие, так и неразрушающие методы диагностики, включая аку-

стический метод и метод магнитной памяти металлов⁵, при одновременном дополнении их проверочными прочностными расчётами. Результатом такого всестороннего анализа является выявление потенциально опасных зон концентраций напряжений⁶. Обнаружение таких зон, которые на начальном этапе могут представлять собой микропластические деформации, едва различимые на поверхности металла с размерами не более нескольких микрон, особенно при целостности лакокрасочного покрытия, сопряжено с большими затратами временных, материальных и финансовых ресурсов. При любых иных условиях без всестороннего подхода вероятность попадания в данные зоны становится очень незначительной [1, 2, 7, 8, 9].

Проведение расчётов на прочность с целью определения остаточного ресурса лимитирующих элементов металлоконструкции теряет свою актуальность, если невозможно идентифицировать критические зоны с высокими напряжениями и получить репрезентативные пробы для анализа. В таких условиях прогнозная оценка может оказаться неточной. В контексте коррозионных процессов ситуация меняется; когда коррозия затрагивает элементы конструкции, ведя к уменьшению по контуру размеров повреждённого поперечного сечения, необходимо проводить расчёт на прочность с учётом коррозионного эффекта, что включает синтез величины утоньшения стенок и интенсивности коррозии с учётом того, как коррозия влияет на усталостные характеристики материала и способствует снижению его эксплуатационных свойств [1, 5, 9, 10].

Основной задачей при проведении работ, связанных со сбором и обработкой фактических данных с точки зрения эксплуатации эскалаторов, является минимизация и рационализация их остановов при проведении комплексных обследований [11, 12].

¹ Поминов И.Н. Эскалаторы метрополитена. Устройство, обслуживание и ремонт. М.: Транспорт, 1994. 320 с.

² Руководство по ремонту эскалаторов. РР-ЭС 992-17. Петербургский метрополитен. СПб., 2017. 96 с.

³ Бардышев О.А., Попов В.А., Филин А.Н., Харлов М.В. Обеспечение безопасности тоннельных эскалаторов. СПб.: Безопасность, 2020. 128 с.

⁴ Tawancy, H. M., Ul-Hamid, A., Abbas, N. M. Practical engineering failure analysis New York: Marcel Dekker, 2004, 616 p.

⁵ Руководство по ремонту эскалаторов. РР-ЭС 992-17. Петербургский метрополитен. СПб., 2017. 96 с.

⁶ Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчёт элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

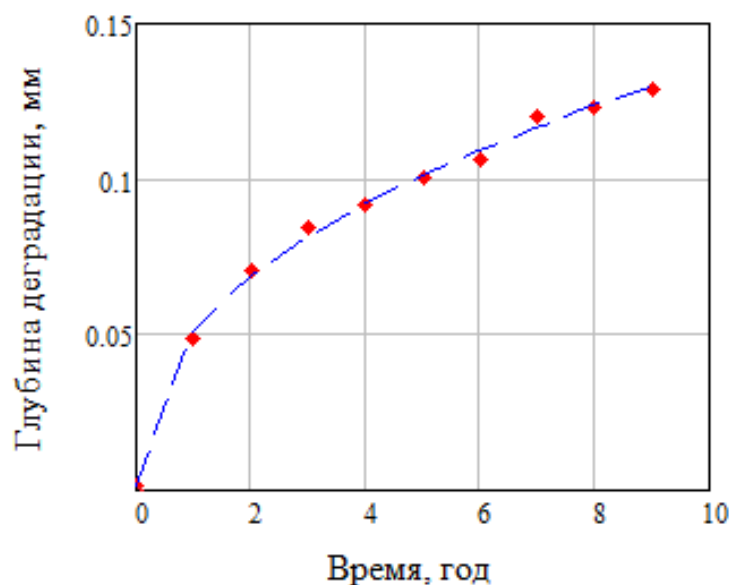


Рисунок – Динамика атмосферной коррозии сталей Ст3пс и Ст3кп:

♦♦♦ – экспериментальные точки;
 — — установленная зависимость
 Источник: составлено авторами.

Figure – Dynamics of atmospheric corrosion of St3ps and St3kp steels (Russian standards):

♦♦♦ – experimental points;
 — — established dependence
 Source: compiled by the authors.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемый объект – металлическая каркасная структура эскалатора метрополитена, находящаяся в среде с индивидуальными характеристиками – является примером плохо организованной системы, в которой трудно выделить и зафиксировать многие факторы и предсказать их взаимодействия⁷. Это обусловлено тем, что связи между различными факторами и их влияние на целостность и работоспособность конструкции в целом до конца не исследованы [1, 9]. Анализ результатов комплексного обследования эскалаторов на базе ГУП «Петербургский метрополитен» в количестве 218 шт., проводимого в период с 2005 по 2019 г.⁸, конструкторской документации, изучение статистических материалов позволили воспользоваться методом матема-

тического моделирования, а также сформулировать принцип рационализации периодов проведения диагностических обследований элементов металлоконструкций эскалаторов метрополитена.

Данный принцип предполагает, что общий срок службы объекта, а в случае исследовательских работ – период экспозиции образцов, делится на несколько пропорциональных временных интервалов, начинающихся от момента запуска объекта в эксплуатацию, или начала экспозиции. Подобное разделение позволяет эффективно управлять обработкой потоков данных и сокращать количество диагностических обследований через применение точных прогностических моделей, которые предоставляют итоговые результаты с высокой степенью достоверности.

⁷ Schweitzer, P. A. Fundamentals of Metallic Corrosion: Atmospheric and Media Corrosion of Metals. BocaRaton, CRC Press, 2006, 752 p.

⁸ ГУП «Петербургский метрополитен». Технические характеристики метрополитена [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.metro.spb.ru/metro.html?v=1> (дата обращения: 25.07.2024).

Таблица 1
Глубинный показатель коррозии малоуглеродистых сталей
Источник: составлено авторами.

Table 1
Deep corrosion index of low-carbon steels
Source: compiled by the authors.

Марка стали	Глубинный показатель коррозии, мм/год		
	1-й год	2-й год	3-й год
СтЗпс	0,057	0,039	0,032
СтЗкп	0,049	0,036	0,030

Заложенный в основу принципа рационализации подход предполагает, что приращение глубинного показателя коррозии s в низкоуглеродистых сталях происходит за пропорциональные промежутки времени на одинаковые значения [1, 5, 9]. Данную тенденцию можно проследить на рисунке, иллюстрирующем динамику изменения глубины коррозионной деградации с течением времени, которую можно условно подразделить на две характерные фазы по обе стороны от точки инфлексии: вначале происходит резкое ускорение коррозионного процесса, а затем постепенное снижение темпов коррозии. Это замедление в деградации связывается с формированием коррозионных продуктов на поверхности материала, которые со временем накапливаются и начинают выполнять уже защитные функции. Соответственно, с увеличением промежутков времени между расчётными значениями и снижением величины приращения глубинного показателя коррозии с течением времени можно сделать вывод, что заложенный в основу принципа рационализации подход верен.

Основываясь на особенностях кинетики атмосферной коррозии низкоуглеродистых сталей, процесс коррозионного износа отдельных элементов опорных металлоконструкций эскалаторов метрополитена может быть отображён через специализированную математическую модель.

Математическое моделирование коррозионных процессов в их увязке со статической и динамической составляющими при эксплуатации эскалаторов основывается на много-многозначные причинно-следственные отношения. Для более полного и точного выражения реально происходящих процессов коррозионного разрушения необходимо пред-

усматривать наличие обратной связи, которая реализуется, например, следующим образом: глубина коррозии с течением времени прогрессирует, что приводит к уменьшению сечения элемента и, следовательно, к увеличению значения напряжения, что, в свою очередь, определяет динамику увеличения глубины коррозии. Статическая составляющая, определяемая собственным весом металлоконструкции и агрегатов эскалатора, и динамическая составляющая, определяемая непрерывным движением некоторой совокупности деталей, приводит к изменению структуры материала элементов металлоконструкции, в частности, к межзёрённому разрушению, что впоследствии становится предпочтительным местом для развития коррозионных процессов.

В общем, модель [1, 5, 9] представляется совокупностью уравнений, учитывающих не только параметры окружающей среды, исходя из географического положения и сезонности, но и конструктивные особенности элементов в их взаимосвязи с воздействием множественных циклов нагружения.

В данной статье используется фрагмент математической модели (1), разработанной в рамках научного исследования, который характеризует равномерное проникновение коррозионного разрушения вглубь металла. Это даёт возможность предварительно оценить способность модели к модификации её параметров под конкретные условия эксплуатации.

$$\begin{cases} s = K\tau^n \\ n = \log_{\tau}\left(\frac{v}{K}\right) + 1 \\ K = 0.063 + 7.831 \cdot v \\ v = (0.362 \cdot \ln(C + 68.066) - 1.526) \cdot k_{\varphi} \end{cases}, \quad (1)$$

Таблица 2

Определение конечной величины времени экспозиции согласно принципу пропорциональности
Источник: составлено авторами.

Table 2

Determination of the final exposure time according to the principle of proportionality
Source: compiled by the authors.

t , год	Величина s согласно (1), мм	Величина s согласно (3), мм	Погрешность, %
СтЗпс ($s=0,0574t^{0,47}$)			
4,8	0,120	-	-
7,7	0,150	-	-
12,4	0,187	$0,150 + (0,150 - 0,120) = 0,180$	3,9
20	0,235	$0,187 + (0,187 - 0,150) = 0,224$	4,9
СтЗкп ($s=0,0514t^{0,43}$)			
4,8	0,101	-	-
7,7	0,124	-	-
12,4	0,152	$0,124 + (0,124 - 0,101) = 0,147$	3,4
20	0,186	$0,152 + (0,152 - 0,124) = 0,180$	3,3

где K – стартовый коэффициент, соответствующий средней скорости коррозии за первый год;

n – коэффициент, учитывающий замедление процесса коррозии вследствие формирования защитной плёнки из продуктов коррозии;

t – продолжительность эксплуатации объекта (продолжительность экспозиции материала);

u – скорость коррозии;

k_{φ} – коэффициент влажности среды;

$C = C_{Cl} + 1.211C_{SO_2}$ – эквивалентный уровень концентрации коррозионно-активных веществ в окружающей атмосфере;

C_{SO_2} – концентрация двуокиси серы (сернистого ангидрида), определяемая газоанализатором по типу контролируемого вещества;

C_{Cl} – концентрация хлоридов в окружающей среде, определяемая также газоанализатором по типу контролируемого вещества.

Модель (1) позволяет уже на раннем этапе оценить воздействие отдельных компонентов среды на процесс, что значительно расширяет спектр возможностей её применения.

Справедливость использования степенной функции при описании процессов коррозии подтверждается, например, при проведении регрессионного анализа экспериментальных данных, представленных в таблице 1, при этом обычно значение n не превышает 0,5.

Изучение данных таблицы 1 позволяет сделать вывод о том, что глубина коррозионных изменений для сталей марок СтЗкп и СтЗпс примерно одинакова – различие между ними не превышает 10%. Это указывает на то, что скорость атмосферной коррозии для этих сталей не имеет прямой зависимости от их химического состава, который регламентируется ГОСТ 380–2005, а скорее обусловлена внешними факторами. В частности, именно такие параметры окружающей среды, как тем-

пература, влажность и химически активные компоненты в атмосфере, оказывают определяющее влияние на коррозионный процесс данных сталей⁹.

Рассмотрим более подробно математическую модель (1) согласно с принципом рационализации.

Применяя принцип золотого сечения при разделении продолжительности эксплуатации объекта t , под которым понимается металлическая каркасная структура эскалатора метрополитена, на пропорциональные временные интервалы, примем $\varphi = 0,618$. Значение данного коэффициента считается согласно определению принципа золотого сечения исходя из того, что при делении периода эксплуатации большая часть относится к меньшей так же, как и весь период относится к его большей части. В результате чего получаем $\tau_1 = 0,618t$, $\tau_2 = 0,618\tau_1$, ..., $\tau_i = 0,618\tau_{i-1}$. Количество значений высчитывается исходя из степени агрессивности окружающей среды и установленного нормативной документацией срока службы эскалатора метрополитена.

Определим приращение величины глубинного показателя коррозии s за эти промежутки времени. Считая, что $s_1 = K \cdot \tau_1^n$, $s_2 = K \cdot \tau_2^n$ и так далее, получаем выражение

$$s - s_1 = s_1 - s_2. \quad (2)$$

Иначе

$$s = s_1 + (s_1 - s_2). \quad (3)$$

Использование именно пропорции золотого сечения оказалось оправдано экспериментальными результатами. Иные значения φ сказываются в перспективе либо на изменении прогнозной величины глубинного показателя коррозии, либо на увеличении погрешности.

Для оценки состояния отдельных элементов металлоконструкций, подвергающихся воздействию коррозии, предположим, что общий срок службы металлоконструкции эскалатора составляет $t = 20$ лет. Для частных интервалов времени определены следующие значения: $\tau_1 = 12,4$ года, $\tau_2 = 7,7$ года, $\tau_3 = 4,8$ года. Первоначально производится расчёт с применением степенной функции математической модели (1) пропорциональных величин s , затем по определённым значениям τ_1 , τ_2 и τ_3 – вычисление s с использованием

полученного выражения (3). Далее делается сравнительный анализ двух наборов данных, при этом результаты, полученные при использовании модели (1), интерпретируются как фактические экспериментальные измерения (математическое моделирование результатов эксперимента).

Сравнение результатов позволяет проверить валидность и точность выражения (3), используемого для прогнозирования износа металлоконструкций при долгосрочной эксплуатации, а также может выявить потенциальные ошибки или дать основания для корректировки математических моделей для более точного совпадения с реальными условиями эксплуатации. Результаты регрессионного анализа данных таблицы 1 и расчётов сведены в таблицу 2.

Исходя из анализа данных, представленных в таблице 2, применение пропорции золотого сечения подтверждает свою эффективность. При n , не превышающем значение 0,5, точность подобных расчётов остаётся достаточно высокой, так как погрешность не больше 5%. Выход за значение пропорции золотого сечения в большую сторону влечёт за собой одновременно рост ожидаемой величины s и увеличение погрешности, в меньшую сторону – снижение погрешности с одновременным уменьшением прогнозируемой величины s . Таким образом, можно заключить, что использование золотого сечения как основы для принципа рационализации является оптимальным с точки зрения уравнивания точности и достоверности прогнозируемых величин.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При оценке состояния металлоконструкций эскалаторов, используемых в метрополитене, в частности отдельных лимитирующих элементов, важно определять оптимальные сроки для их диагностического обследования. В этом контексте, 20-летний эксплуатационный период разделяется на ряд пропорциональных временных отрезков (20, 12,4, 7,7 и 4,8 лет), чтобы более эффективно оценить динамику коррозионных процессов. Согласно (3) ключевыми моментами для определения конечного значения величины коррозионного эффекта (величины s) являются оценки, сделанные через 12,4 и 7,7 лет от начала эксплуатации (или экспозиции). Принцип рационализации позволяет заметно сократить время, необходимое

⁹ Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1969. 448 с.

для оценки конечного значения коррозионного эффекта, сокращая общий срок на 7,6 года или 38% по сравнению с полным 20-летним циклом. Кроме того, для повышения точности прогнозирования результата можно сопоставить расчёты с использованием данных, полученных в 7,7 и 4,8 г., с фактическими данными на 12,4 г. экспозиции (эксплуатации) и внести необходимые коррективы.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительный анализ результатов комплексного обследования эскалаторов на базе ГУП «Петербургский метрополитен» позволил установить ряд регрессионных зависимостей между процессами развития коррозионных и усталостных повреждений металлоконструкций эскалаторов метрополитена, а также сформулировать принцип рационализации периодов проведения диагностических обследований отдельных конструктивных элементов.

Современная практика комплексного обследования опорных металлоконструкций эскалаторов метрополитена, как и длительные экспозиции образцов материалов, не включает в себя применение принципа рационального распределения временных интервалов. В большинстве случаев для оценки результатов используют равные временные промежутки, что не всегда является эффективным подходом. Отсутствие рационального распределения интервалов ведёт к усложнению обработки экспериментальных данных и невозможности своевременно делать обоснованные выводы, что фактически приводит к необходимости проводить диагностические обследования на протяжении полного запланированного срока, вплоть до его номинального значения, в то время как при соблюдении принципа рационализации при распределении временных интервалов можно достигнуть более раннего завершения того или иного комплекса работ, получив интересующий конечный результат.

Применение формулы (3) даёт возможность не только упростить вычисления степени коррозионного воздействия, но и сократить продолжительность экспериментов или количество периодических диагностических обследований за счёт точности прогноза. Принцип рационализации можно считать новым подходом к проведению ускоренных испытаний на коррозионную стойкость материалов, который одновременно служит для точной прогностической оценки коррозионного износа металлоконструкций эскалаторов метрополитена в процессе их эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дятлов В.Н. Моделирование процесса коррозии несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // Вестник МАДИ. 2022. №1 (68). С. 29–35.
2. Харлов М.В., Попов В.А. Методика оценки технического состояния эскалатора // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т.9, № 4. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf> (дата обращения: 25.07.2024).
3. Попов В.А., Еланцев В.В. К вопросу повышения эффективности безопасности эксплуатации тоннельных эскалаторов метрополитена. Управление рисками // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 3(49). С. 10–22. DOI: <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-49-3-10-22>.
4. Еланцев В.В. К вопросу повышения эффективности и безопасности эксплуатации тоннельных эскалаторов метрополитена. Алгоритм прогнозирования технического состояния // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 2. С. 32–41.
5. Дятлов В.Н., Орлов С.В., Попов В.А. Совместное влияние циклических нагрузок и коррозии на техническое состояние металлоконструкций эскалаторов метрополитена // Мир транспорта. 2023. Т. 21, № 4 (107). С. 21–28. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-3>.
6. Sharav N., Szeinuk M., Shifan Y. Does your city need a metro? – A Tel Aviv case study. Case Studies on Transport Policy. 2018. no. 6 (4). pp. 537–553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.07.002>.
7. Kazarinov N., Smirnov A., Petrov Y., Gruzdkov A. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete mechanical system. 2020. E3S Web of Conferences. P. 157. № 01020, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111141&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015701020&partnerID=40&md5=ff349ae2159696f6435772713fca13e8> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.1051/e3sconf/202015701020.
8. Uzdin A., Prokopovich S. Some principles of generating seismic input for calculating structures (2020) E3S Web of Conferences. 2020. P. 157. № 06021. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111517&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015706021&partnerID=40&md5=2c52657ac32615f175abb033915b52dc> (дата обращения: 25.07.2024). DOI: 10.1051/e3sconf/202015706021.
9. Дятлов В.Н. Уточнение модели развития коррозионных дефектов несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // Вестник МАДИ. 2022. № 3 (70). С. 46–50.
10. Ватулин Я.С., Попов В.А., Дятлов В.Н. Техническое диагностирование закладных элементов крановых путей грузоподъемного оборудования в машинных залах тоннельных эскалаторов // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16, № 3. С. 241–250. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106323>
11. Ермилова А.В., Будрина Е.В. Инновационный вектор развития эффективной стратегии экс-

плуатации тоннельных эскалаторов // Экономика. Право. Инновации. 2020. № 1. С. 57–64.

12. Casals M., Gangoellis M., Forcada N., Macarulla M., Giretti A., Vaccarini M. SEAM4US: An intelligent energy management system for underground stations. *Applied energy*. 2016. vol. 166. pp. 150–164. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.029

REFERENCES

1. Dyatlov V.N. Modeling of the corrosion process of bearing metal structures of the subway escalator. *Vestnik MADI*. 2022; 1(68): 29–35. (In Russ.)

2. Kharlov M.V., Popov V.A. Technique for assessing the technical condition of the escalator. *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2017; vol. 9, no. 4. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/05TVN417.pdf> (accessed 25.07.2024). (In Russ.)

3. Popov V.A., Yelantsev V.V. Increasing the efficiency and safety of operation of underground tunnel escalators. Management of risks. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. no. 3 (49), pp. 10–22 (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-49-3-10-22>.

4. Elantsev V.V. To the question of improvement efficiency and safety operation of underground tunnel escalators. technical state forecasting algorithm. *International journal of applied and fundamental research*. 2021; 2: 32–41 (in Russ.)

5. Dyatlov V.N., Orlov S.V., Popov V.A. Combined Influence of Cyclic Loads and Corrosion on the Technical Condition of Metal Structures of Metro Escalators. *World of Transport and Transportation*. 2023; 21(4): 21–28. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-3>

6. Sharav N., Szeinuk M., Shifan Y. Does your city need a metro? – A Tel Aviv case study. *Case Studies on Transport Policy*. 2018; 6 (4): 537–553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.07.002>

7. Kazarinov N., Smirnov A., Petrov, Y., Gruzdkov A. Dynamic fracture effects observed in a one-dimensional discrete mechanical system. *E3S Web of Conferences*. 2020. 157. 01020. DOI: 10.1051/e3sconf/202015701020. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111141&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015701020&partnerID=40&md5=ff349ae2159696f6435772713fca13e8> (assessed: 25.07.2024). DOI: 10.1051/e3sconf/202015701020.

8. Uzdin A., Prokopovich S. Some principles of generating seismic input for calculating structures. *E3S Web of Conferences*. 2020. 157. article № 06021. DOI: 10.1051/e3sconf/202015706021. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084111517&doi=10.1051%2fe3sconf%2f202015706021&partnerID=40&md5=2c52657ac32615f175abb033915b52dc> (assessed: 25.07.2024).

9. Dyatlov V.N. Clarification of the model of development of corrosion defects of bearing metal structures of metro escalators. *Vestnik MADI*. 2022; 3(70): 46–50. (In Russ.)

10. Vatulín YS, Popov VA, Dyatlov VN. Technical diagnostics of the embedded elements of crane tracks

of lifting equipment in machine halls of tunnel escalators. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2022; 16(3): 241–250. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-106323>

11. Yermilova A.V., Boudrina E.V. Innovative vector of development of effective strategy for tunnel escalator operating. *Economics. Law. Innovation*. 2020; 1: 57–64 (in Russ.)

12. Casals M., Gangoellis M., Forcada N., Macarulla M., Giretti A., Vaccarini M. SEAM4US: An intelligent energy management system for underground stations. *Applied energy*. 2016; vol. 166: 150–164. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.01.029

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Дятлов В.Н. Формирование цели научного исследования. Анализ результатов комплексного обследования эскалаторов, разработка математической модели. Анализ состояния вопроса. Получение данных для анализа и подготовка материалов для статьи.

Кононов Д.П. Руководство темой исследования. Формирование целей и задач исследования. Разработка научной концепции.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Dyatlov V.N. Substantial contribution to the design and the research purpose. Analysis of the data obtained on comprehensive examination of escalators, development of a mathematical model. State of the art analysis. Collecting data for analysis and preparing materials for the article.

Kononov D.P. Management of the research topic investigation. Drafting the research goals and objectives. Substantial contribution to the research conception.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дятлов Вячеслав Николаевич – преподаватель Великолукского филиала ПГУПС (182100, Псковская обл., г. Великие Луки, пр. Гагарина, 95), стажёр кафедры «Наземные транспортно-технологические машины» Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) (190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4864-7554>, **SPIN-код:** 2978-6706, e-mail: w.dyatlov@gmail.com

Кононов Дмитрий Павлович – д-р техн. наук, доц., проф. кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС) (190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3662-550X>, **SPIN-код:** 8591-3240, e-mail: d_kononov@mail.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vyacheslav N. Dyatlov – lecturer at the Velikiye Luki branch of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Velikiye Luki branch PGUPS)

(182100, Pskov region, Velikiye Luki, 95 Gagarin Ave.), trainee at the Department of Land Transport and Technological Machines of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4864-7554>, **SPIN-код:** 2978-6706, e-mail: w.dyatlov@gmail.com

Dmitry P. Kononov – Dr. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Land Transport and Technological Complexes of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (190031 St. Petersburg, 9 Moskovsky pr.), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3662-550X>, **SPIN-код:** 8591-3240, e-mail: d_kononov@mail.ru