

Научная статья
УДК 621.876.32
doi: 10.46684/2687-1033.2023.4.406-412

Анализ причин изменения состояния опорных металлоконструкций эскалаторов метрополитена

В.Н. Дятлов

Великолукский филиал Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Великолукский филиал ПГУПС); г. Великие Луки, Россия; w.dyatlov@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Метрополитен в Санкт-Петербурге — основной вид транспорта, насчитывает 72 станции, на которых установлено 303 эскалатора и 30 траволаторов различных типов. Тоннельные и пролетные эскалаторы в силу своих конструктивных особенностей являются одновременно и машиной, и сооружением. Срок службы части эскалаторов к началу 2023 г. вышел за предельные значения, установленные нормативно-технической документацией. Если какие-либо узлы и механизмы в период проведения ремонтов различных видов могут быть заменены, опорные металлоконструкции за малым исключением продолжают работать в тех же условиях.

Четкое определение факторов, влияющих на изменение состояния опорных металлоконструкций, позволяет разрабатывать качественные методики по выявлению их остаточного ресурса и прогнозированию динамики различных процессов. Эту совокупность факторов можно разделить условно на две группы: факторы, связанные с особенностями конструкции, и факторы, связанные с эксплуатацией и условиями окружающей среды.

Нагрузки, передаваемые на опорную металлоконструкцию, складываются из большого количества компонентов различного происхождения и при оценке их влияния необходимо учитывать количественные накопления коррозионных повреждений.

Ключевые слова: метрополитен; эскалатор; опорная металлоконструкция; факторы; статическая и динамическая нагрузки; остаточный ресурс; прогнозирование; атмосферная коррозия

Для цитирования: Дятлов В.Н. Анализ причин изменения состояния опорных металлоконструкций эскалаторов метрополитена // Техник транспорта: образование и практика. 2023. Т. 4. Вып. 4. С. 406–412. <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2023.4.406-412>.

Original article

Analysis of the causes of changes in the state of supporting metal structures of metro escalators

Viacheslav N. Dyatlov

Velikoluksky branch of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Velikoluksky branch of PGUPS); Velikie Luki, Russian Federation; w.dyatlov@gmail.com

ABSTRACT

The metro in St. Petersburg, being the main mode of transport, has 72 stations, which have 303 escalators and 30 travelators of various types. Tunnel and span escalators, due to their design features, are both a machine and a structure. The service life of a part of the escalators by the beginning of 2023 exceeded the limits set by the regulatory and technical documentation.

If any components and mechanisms can be replaced during repairs of various types, the supporting metal structures, with few exceptions, continue to work in the same conditions. A clear definition of the factors influencing the change in the state of supporting metal structures allows us to develop qualitative methods for determining their residual life and predicting the dynamics of various processes.

This set of factors can be divided conditionally into two groups: factors related to design features and factors related to operation and environmental conditions. In conclusion, it is noted that the loads transmitted to the

© В.Н. Дятлов, 2023

supporting metal structure consist of a large number of components of various origins and when assessing their impact, it is necessary to take into account the quantitative accumulation of corrosion damage.

Keywords: subway; escalator; supporting metal structure; factors; static and dynamic loads; residual resource; forecasting; atmospheric corrosion

For citation: Dyatlov V.N. Analysis of the causes of changes in the state of supporting metal structures of metro escalators. *Transport technician: education and practice*. 2023;4(4):406-412. (In Russ.). <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2023.4.406-412>.

ВВЕДЕНИЕ

Санкт-Петербург — это самый большой северный мегаполис современной Европы. Географическая особенность города заключается в его расположении на более чем 100 островах в дельте р. Невы, при этом большинство наземных транспортных потоков осуществляется посредством разводных мостов через главные русла Невы и не обеспечивают достаточную перевозочную пассажирскую мощность. Поэтому в 1955 г. в Санкт-Петербурге появился новый вид общественного транспорта — метрополитен.

Сегодня метрополитен в Санкт-Петербурге, являясь одним из прогрессивных видов общественного транспорта и обслуживая ежедневно до 4 млн пассажиров, стал основным видом городского транспорта. В распоряжении компании «Петербургский метрополитен» находится 72 станции, на которых установлено 303 эскалатора и 30 траволаторов различных типов¹.

Главным функциональным (технико-экономическим) назначением эскалаторов служит обеспечение бесперебойного, комфортного и самое главное безопасного перемещения пассажиров с установленными скоростями в течение всего срока эксплуатации. Специфика эксплуатации эскалаторов, в отличие от других типов грузоподъемных машин, состоит в напряженности ритма работы и циклически изменяющейся загруженности транспортных систем в соответствии с установившимися режимами и вероятных отказах, как и определяемых ими вынужденных перерывов для производства ремонтно-восстановительных работ, что может повлечь за собой ограничение в использовании тех или иных станций метрополитена пассажирами вплоть до полного их исключения из пассажиропотока. Одновременно с этим надежное и безопасное функционирование эскалаторов ме-

трополитена обеспечивается за счет своевременного производства планово-предупредительных ремонтов, что в значительной степени выявляет экономические показатели эффективности эксплуатации оборудования [1, 2].

В данной работе определен и проанализирован комплекс основных факторов, влияющих на изменение состояния опорных металлоконструкций эскалаторов метрополитена в период эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — металлоконструкция эскалатора метрополитена — представляет собой плохо организованную систему, где изначально сложно детерминировать многие явления при том, что причинность тех или иных связей недостаточно изучена. Анализ результатов проведенных исследований, изучение конструкторской и нормативной документации, статистических материалов позволили определить ряд факторов, влияющих на изменение состояния опорных металлоконструкций эскалаторов метрополитена, которые можно условно разделить на две группы: факторы, связанные с особенностями конструкции, и факторы, связанные с эксплуатацией и условиями окружающей среды, а также воспользоваться методом математического моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эскалаторы — это подъемно-транспортные устройства с замкнутым контуром лестничного полотна, предназначенные для транспортирования людей с одного уровня на другой, и в соответствии с Федеральным законом от 21.07.1997

¹ ГУП «Петербургский метрополитен». Технические характеристики метрополитена. URL: <http://www.metro.spb.ru/metro.html?v=1>

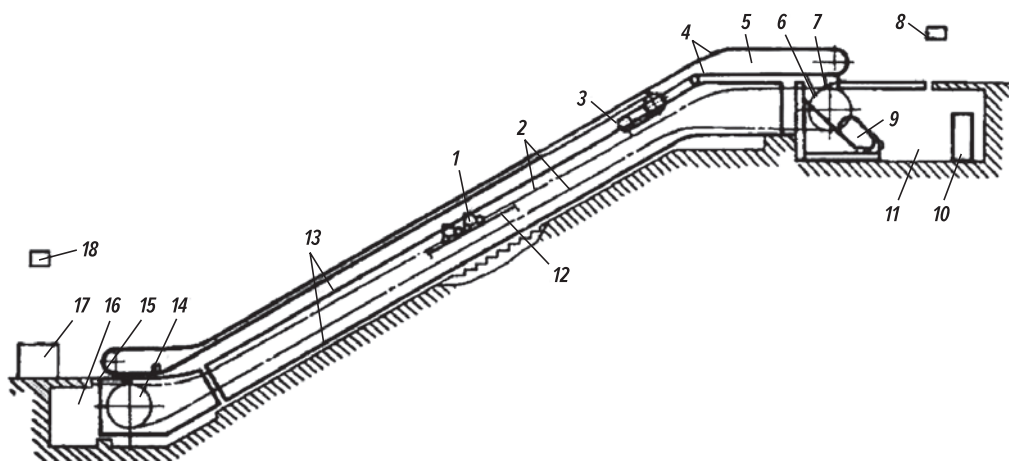


Рис. 1. Схема тоннельного эскалатора: 1 – ступень; 2 – цепи тяговые; 3 – привод поручня; 4 – поручень; 5 – балюстрада; 6 – звездочка тяговая; 7 – верхняя площадка; 8, 18 – пульты управления; 9 – механизм привода и передаточный механизм; 10 – шкафы управления; 11 – машинное помещение; 12 – направляющие; 13 – опорные металлоконструкции; 14 – звездочка натяжная; 15 – нижняя площадка; 16 – натяжная камера; 17 – кабина оператора

№ 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (в редакции, действующей с 01.07.2021) отнесены к четвертому классу опасности. В то же время тоннельные и пролетные эскалаторы с тяжелым режимом работы, эксплуатируемые на базе ГУП «Петербургский метрополитен», являются одновременно и машиной, и сооружением.

Основное отличие тоннельных эскалаторов от пролетных заключается в том, что первые осуществляют транспортирование пассажиров между верхним уровнем вестибюля и нижним уровнем платформы станции (рис. 1); вторые, имея также своим основным назначением — транспортирование пассажиров, применяются не в тоннелях, а в пролетах между уровнями на переходах и станциях котлованного типа (рис. 2).

Тоннельные и пролетные эскалаторы, относящиеся к категории подъемно-транспортных машин, обладают по сравнению с другими типами машин этой же категории довольно высокой, но в то же время ограниченной пропускной способностью и, хотя зоны их установки, исходя из специфики применения, различаются, нормативные требования, предъявляемые к обоим типам эскалаторов, одни и те же².

Опорная металлоконструкция эскалатора, являясь его несущей основой, устанавливается на

фундаменты тоннеля или перекрытия. Все механическое оборудование эскалатора размещается на металлоконструкции, как и часть электрооборудования [3]. Наиболее часто при изготовлении опорных металлоконструкций эскалаторов в России используется сталь СтЗсп или СтЗпс в основном в виде листового и сортового (двутавры, швеллеры и уголки) проката, в местах наибольших нагрузок могут быть использованы составные сварные балки.

При проведении различных видов ремонтов эскалаторов, обусловленных как возникновением аварийной ситуации, так и в результате производ-

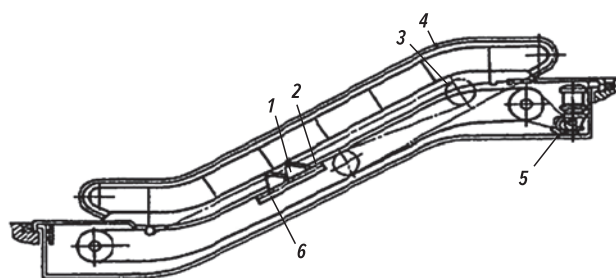


Рис. 2. Схема пролетного эскалатора: 1 – ступень; 2 – цепи тяговые; 3 – привод поручней; 4 – поручень; 5 – привод лестничного полотна; 6 – направляющие ходовых катков ступеней

² Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности эскалаторов в метрополитенах» (утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03.12.2020 № 488, зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 23.12.2020, регистрационный № 61728).



Рис. 3. Металлическая поверхность образца: а — до испытаний; б — после 10^3 циклов нагружения; в — после $2 \cdot 10^3$ циклов нагружения

ства планово-предупредительных ремонтов, обычно происходит детектирование неисправностей и замена тех или иных узлов и механизмов, определяющих функционирование эскалатора как подъемно-транспортной машины для перемещения пассажиров между уровнями. Опорные металлоконструкции, оставаясь за малым исключением на своем первоначальном месте, продолжают работать при тех же неизменных условиях [2, 3]. При этом следует учитывать то, что часть эскалаторов, чей срок службы на начало 2023 г. вышел за пределы, установленные нормативно-технической документацией, прошли в среднем по 7–9 капитальных ремонтов.

В процессе эксплуатации реальное состояние элементов опорной металлоконструкции эскалатора может существенно изменяться: прогрессирует величина зазоров в сочленениях, проявляются остаточные деформации в виде прогибов несущих элементов, формируются и развиваются трещины и т.д. Иногда конструкция частично или в целом подвергается модернизации, что может повлечь за собой изменение жесткости составных элементов и, как результат, изменение режима ее нагружения. Изменившаяся жесткость несущего элемента металлоконструкции неизбежно приводит к перераспределению нагрузки в сопряженных частях металлоконструкции. В таких условиях лимитирующим (в смысле ресурса машины в целом) элементом может оказаться совсем иной элемент металлоконструкции, чем принятый в проектной (заводской) расчетной методике.

Некоторая совокупность деталей, составляющих общую конструкцию эскалатора, при его функционировании находится в непрерывном движении, нагрузки, действующие при этом на них, с течением времени меняются, также происходит постоянное изменение положения той или иной детали по отношению к нагрузке, что вызывает появление циклических (периодически повторяющихся) напряжений не только в подвижных деталях, но и непосредственно в опорной металлоконструкции эскалатора. Такого рода нагрузки приводят к разрушению отдельных элемен-

тов конструкции при напряжениях, значительно меньших, чем предел текучести или предел прочности [4]. Такое разрушение принято называть усталостным.

Усталость материала определяется и объясняется неоднородностью его реальной структуры и, как следствие, накоплением микрповреждений под действием циклически изменяющихся напряжений, что приводит к появлению усталостных трещин и впоследствии к разрушению.

Для стали СтЗпс типична микроструктура, состоящая из зерен феррита и перлита. Как видно из рис. 3, уже на первых этапах усталостных испытаний в зернах феррита появляются устойчивые полосы скольжения, которые при последующем нагружении сливаются, возникают также и новые полосы скольжения. Ориентированы устойчивые полосы скольжения преимущественно поперек оси нагружения.

Межзеренное разрушение является наиболее предпочтительным местом для возникновения коррозионных процессов, в результате чего окружающая коррозионная среда, воздействуя и изменяя микрорельеф поверхности разрушения, может значительно увеличить количество элементов хрупкого разрушения, скола и других структурных дефектов.

Опорная металлоконструкция эскалатора, как и эскалатор в целом, должна эксплуатироваться не только при установившемся движении в условиях неравномерной скорости движения цепей, но и при пуско-тормозных режимах, а также в стопорных режимах при заклинивании тяговых цепей [5].

Динамичность нагрузки в данном случае обеспечивается приводными звездочками вследствие их непосредственного контакта с тяговыми цепями, при этом скорость движения цепей имеет пульсирующий характер. При этом следует учитывать и вибрационный след, накладываемый на опорную металлоконструкцию со стороны приводной группы (рис. 4).

Изменение нагрузки на отдельные подвижные элементы и опорную металлоконструкцию эска-

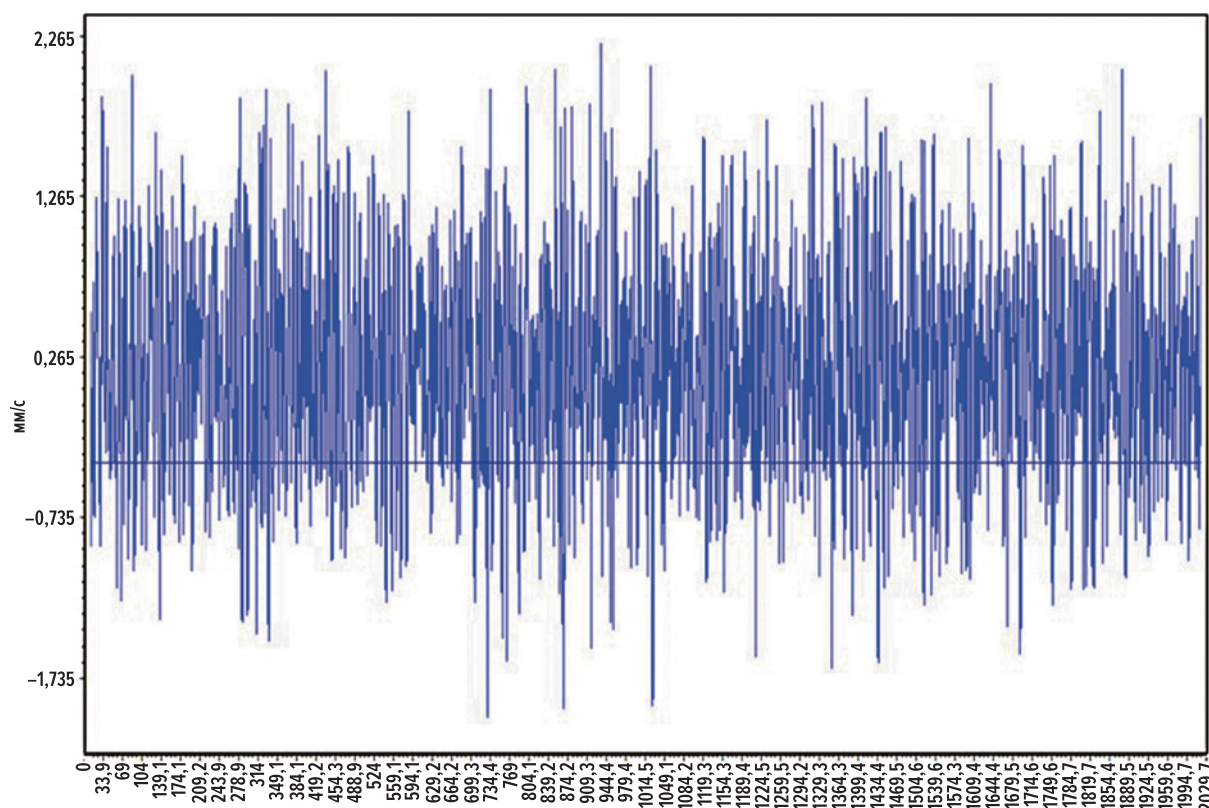


Рис. 4. Вибросигнал работающего редуктора тоннельного эскалатора

латора обеспечивается также за счет изменения величины пассажиропотока, который изменяется сообразно принятым режимам труда и отдыха [6].

К недостаткам несущих металлоконструкций эскалаторов необходимо также отнести их подверженность коррозии, что связано в первую очередь с теми материалами и сортаментом, из которых изготавливаются опорные металлоконструкции, а также с их пространственной ориентацией (рис. 5). Очевидно, это упрощает и удешевляет процесс их изготовления, однако, если принять во внимание такой фактор как подверженность коррозионным повреждениям, то сразу проявляется ряд очевидных недостатков, которые определяются значительным увеличением площадей поверхностей, подвергающихся воздействию коррозионной среды; образованием большого количества щелей и зазоров, где могут задерживаться и накапливаться химически активные загрязнения и влага; затруднениями, связанными с полноценной очисткой поверхностей и нанесением защитных лакокрасочных покрытий.

В общем случае под коррозией металлов следует понимать их самопроизвольное разрушение в результате химического или электрохимического взаимодействия с внешней коррозионной средой, при этом для выявления и описания самого процесса коррозии применяется термин «коррозионный процесс», а для понимания и оценивания

результата процесса используется термин «коррозионное разрушение».

В настоящее время к процессу создания математических моделей атмосферной коррозии существует два подхода: первый подход связан с определением прогнозной оценки, рассчитываемой с учетом влияния различных метеорологических факторов; второй определяется построением моделей на основе физико-химических представлений о процессах коррозии с перебором факторов, влияющих на коррозию металлов.

Краткий анализ позволяет выделить ключевые факторы, первостепенно влияющие на скорость атмосферной коррозии. К ним следует отнести относительную влажность атмосферы, суммарную длительность пребывания пленки влаги, сформировавшейся на поверхности металла, и концентрацию агрессивных примесей. Попадание влаги на опорные металлоконструкции эскалаторов может происходить не только из внешней среды посредством пассажиров и при влажной очистке и профилактике тех или иных конструктивных элементов эскалатора, причиной могут быть и грунтовые воды с изменяющимся химическим составом с учетом глубины залегания.

Точно определить, какой из видов коррозионного разрушения наиболее опасен, не представляется возможным. Это зависит, прежде всего, от условий эксплуатации. Если речь идет о силовых

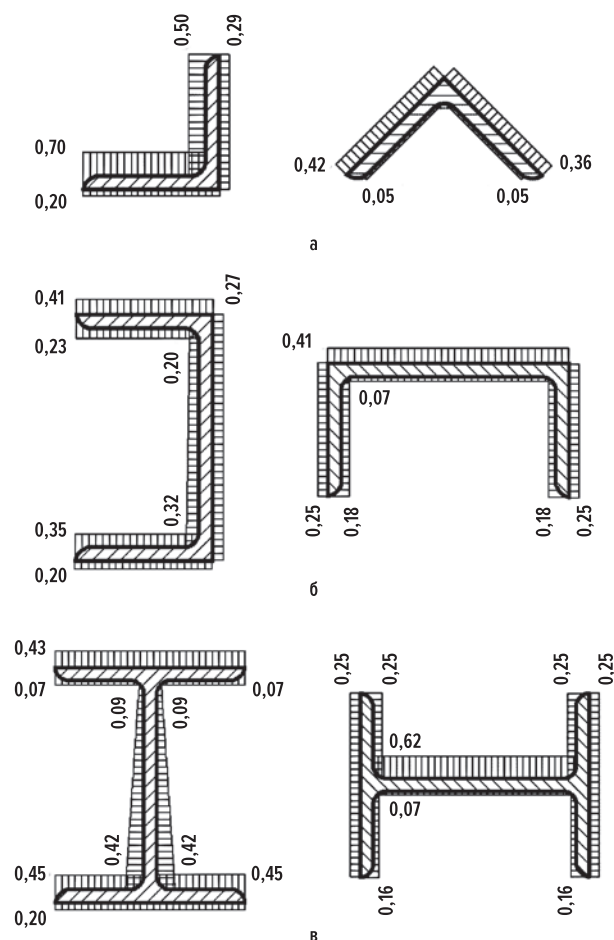


Рис. 5. Значения скоростей коррозии по периметру сечения стальных профилей с учетом изменения пространственной ориентации, мм/год:
а — равнополочного уголка; б — швеллера;
в — двутавра

элементах опорных металлоконструкций, то наиболее опасны межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание; для поверхностей трения и прокатывания наиболее опасной является сплошная коррозия. В отдельных случаях опасность представляет не столько сама коррозия, сколько загрязнение поверхности ее продуктами и в этом случае самая нежелательная — сплошная коррозия равномерного типа.

Накопление коррозионных повреждений опорными металлоконструкциями эскалаторов метрополитена с течением времени сопровождается снижением несущей способности, жесткости и трещиностойкости вплоть до их разрушения, что может повлечь за собой не только финансовые, но и людские потери.

В связи с отсутствием оригинальной математической модели, применимой для расчетов к металлоконструкциям эскалаторов метрополитена, с целью ее разработки обоснованно был выбран второй подход. Полученная универсальная математи-

ческая модель [2, 7] (процесс ее создания в рамках данной работы не рассматривается), с помощью которой можно моделировать как внешние, так и внутренние факторы повреждаемости, позволяет оценить фактическое коррозионное состояние опорных металлоконструкций эскалаторов метрополитена, а также рассчитать прогнозную динамику изменения этого состояния.

$$\left\{ \begin{aligned} s &= A\tau^m \\ m &= \log_{\tau} \left(\frac{v}{A} \right) + 1 \\ A &= 0,063 + 7,831 \cdot v \\ v &= (0,362 \cdot \ln(C + 68,066) - 1,526) \cdot k_{\varphi}, \\ \sigma_{(T)C} &= \sigma_{T0} \cdot e^{\left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]} \cdot \gamma_d \\ \delta &= \delta_1 \cdot (1 + (\tau - 1) \cdot k_{ки} \cdot k_{п}) \cdot k_{вп} \\ \delta_{п} &= \delta \cdot \frac{k_{по} \cdot k_{ки}}{k_m} \end{aligned} \right.$$

где s — глубинный показатель коррозии; A и m — экспериментально определяемые постоянные параметры для данного материала; τ — период эксплуатации несущей металлоконструкции эскалатора; v — средняя скорость коррозии; C — показатель концентрации агрессивных загрязнений; k_{φ} — коэффициент влажности среды; $\sigma_{(T)C}$ — расчетное значение предела текучести, учитывающее воздействие агрессивной среды; σ_{T0} — предел текучести в нормальных условиях ($T_0 = 293,15$ К или 20°C); β — коэффициент, характеризующий устойчивость сечения против коррозии; γ_d — коэффициент адсорбционного понижения прочности; δ — глубина деградации материала; $\delta_{п}$ — глубина питтинга; $k_{ки}$ — коэффициент конструктивного исполнения; $k_{п}$ — коэффициент пассивности; $k_{вп}$ — коэффициент, учитывающий долю внутреннего подслоя ржавчины; $k_{по}$ — коэффициент питтингообразования; k_m — коэффициент материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Следует отметить, что все механизмы, входящие в общую конструкцию эскалатора, монтируются на опорную металлоконструкцию, которая в конечном итоге испытывает как статические нагрузки, начиная с собственного веса, так и динамические нагрузки, передающиеся со стороны установленных на ней приводных механизмов и тяговых цепей с поручнями. Каждый отдельный узел или механизм эскалатора является источником колебательных сил различной природы и с различными параметрами. Их общее суммирование и определяет ту общую нагрузку, которая передается на опорную металлоконструкцию в целом. Кроме того, на

развитие тех или иных процессов, связанных со снижением несущей способности, влияет количественное накопление коррозионных повреждений.

Анализ причин изменения состояния металлоконструкций эскалаторов метрополитена показы-

вает, что их возникновение и развитие носит в целом системный характер с присутствием комбинаций случайных локальных событий, проявление которых возможно с неопределенной частотой на различных стадиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бардышев О.А., Попов В.А., Филин А.Н., Харлов М.В. Обеспечение безопасности тоннельных эскалаторов. СПб.: Безопасность, 2020. 128 с.
2. Дятлов В.Н. Моделирование процесса коррозии несущих металлоконструкций эскалатора метрополитена // Вестник МАДИ. 2022. № 1 (68). С. 29–35. EDN GZVFHJ.
3. Поминов И.Н. Эскалаторы метрополитена. Устройство, обслуживание и ремонт. М.: Транспорт, 1993. 320 с.
4. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с. EDN XFNQZV.

5. Руководство по ремонту эскалаторов РР-ЭС 992-17. Петербургский метрополитен. СПб., 2017. 96 с.
6. Дятлов В.Н. Определение факторов, влияющих на изменение состояния опорных металлоконструкций эскалаторов метрополитена // Образование. Наука. Профессия: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. 2022. С. 97–100.
7. Дятлов В.Н. Уточнение модели развития коррозионных дефектов несущих металлоконструкций эскалаторов метрополитена // Вестник МАДИ. 2022. № 3 (70). С. 46–50. EDN VGXVVC.

REFERENCES

1. Bardyshev O.A., Popov V.A., Filin A.N., Kharlov M.V. Ensuring the safety of tunnel escalators. St. Petersburg, Bezopasnost', 2020;128. (In Russ.).
2. Dyatlov V.N. Modeling of the corrosion process of bearing metal structures of the subway escalator. Vestnik MADI. 2022;1(68):29-35. EDN GZVFHJ. (In Russ.).
3. Pominov I.N. Metro escalators. Device, maintenance and repair. Moscow, Transport, 1993;320. (In Russ.).
4. Makhutov N.A. Deformation criteria of destruction and calculation of structural elements for strength. Moscow, Mashinostroyeniye, 1981;272. EDN XFNQZV. (In Russ.).

5. Escalator repair manual PP-ES 992-17. St. Petersburg Metro. St. Petersburg, 2017;96. (In Russ.).
6. Dyatlov V.N. Determination of factors influencing the change in the state of supporting metal structures of metro escalators. Education. Science. Profession: materials of the All-Russian Scientific and practical conference of students, young scientists and specialists. 2022;97-100. (In Russ.).
7. 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. EDN VGXVVC. (In Russ.).

Об авторе

Вячеслав Николаевич Дятлов — старший преподаватель; **Великолукский филиал Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Великолукский филиал ПГУПС)**; 182100, г. Великие Луки, пр-т Гагарина, д. 95; w.dyatlov@gmail.com.

Bionotes

Viacheslav N. Dyatlov — senior lecturer; **Velikoluksky branch of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (Velikoluksky branch of PGUPS)**; 95 Gagarin Avenue, Velikie Luki, 182100, Russian Federation; w.dyatlov@gmail.com.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.01.2023; одобрена после рецензирования 24.07.2023; принята к публикации 28.09.2023.
The article was submitted 04.01.2023; approved after reviewing 24.07.2023; accepted for publication 28.09.2023.