

УДК (UDC) 621.876

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ РАБОТЕ АВАРИЙНОГО ТОРМОЗА ТОННЕЛЬНЫХ ЭСКАЛАТОРОВNUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES
DURING OPERATION OF EMERGENCY BRAKE OF TUNNEL ESCALATORSКозлов М.Н.
Kozlov M.N.Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
(Санкт-Петербург, Россия)
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (St. Petersburg, Russian Federation)

Аннотация. Аварийный тормоз является важнейшим элементом системы безопасности эскалатора, призванным предупреждать негативные последствия возникновения нештатных ситуаций. Однако, ввиду весьма редкого срабатывания данного механизма, влияние динамических нагрузок на его элементы изучено недостаточно. Кроме того, применение тормозов нормально-замкнутого типа с постоянным моментом, требует более детального изучения на предмет схватывания контактирующих поверхностей. Целью данной работы является оценка рабочих параметров, а также напряженно-деформированного состояния элементов аварийного тормоза с применением виртуального моделирования в программном комплексе Comsol Multiphysics, в условиях различной загрузки эскалатора и площади схватывания поверхностей фрикционных. В статье представлены результаты численного моделирования динамического режима нагружения тяжёлых болтов фрикциона храпового устройства аварийного тормоза тоннельного эскалатора. Рассмотрен случай возникновения нештатного состояния узла в результате образования схватывания рабочих поверхностей фрикционного устройства. Представлены результаты численного эксперимента, выполненного в программе конечно-элементного моделирования Comsol Multiphysics в трехмерной нестационарной постановке.

Ключевые слова: эскалатор, аварийный тормоз, динамическая модель, фрикцион.

Дата получения статьи: 02.09.2024
Дата принятия к публикации: 12.11.2024
Дата публикации: 25.12.2024

Сведения об авторе:

Козлов Максим Николаевич – старший преподаватель кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» ФГБОУ ВО «Петербургский университет путей сообщения Императора Александра I»,
e-mail: kozlov_m.n@mail.ru.

Abstract. The emergency brake is an essential element of the escalator safety system, designed to prevent the negative consequences of emergency situations. However, due to the very rare operation of this mechanism, the effect of dynamic loads on its elements has not been sufficiently studied. In addition, the use of normally closed brakes with a constant torque requires a more detailed study of the setting of the contacting surfaces. The purpose of this work is to evaluate the operating parameters, as well as the stress-strain state of the emergency brake elements using virtual modeling in the Comsol Multiphysics software package, under conditions of different loading of the escalator and the area of setting of the friction surfaces. The article presents the results of numerical simulation of the dynamic loading mode of the clutch bolts of the ratchet emergency brake device of the tunnel escalator. The case of the occurrence of an abnormal node position as a result of the formation of a grip on the working surfaces of the friction device is considered. The results of a numerical experiment performed in the program of finite element modeling of Comsol Multiphysics in a three-dimensional nonstationary formulation are presented.

Keywords: escalator, emergency brake, dynamic model, friction.

Date of manuscript reception: 02.09.2024
Date of acceptance for publication: 12.11.2024
Date of publication: 25.12.2024

Author's information:

Maksim N. Kozlov – Senior lecturer of the Department “Ground transportation and technological complexes” at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, e-mail: kozlov_m.n@mail.ru.

1. Введение

Тоннельные эскалаторы метрополитена являются важным инфраструктурным элементом, обеспечивающим высокую пропускную способность станций глубокого заложения метрополитена. Существенную роль в обеспечении надежности и безопасности играют системы аварийного торможения лестничного полотна [1 – 5], обеспечивающие быструю остановку и надежную фиксацию элементов эскалатора при возникновении нештатных и аварийных режимов работы.

Аварийный тормоз современных эскалаторов (рис.1) представляет собой нормально замкнутый фрикционный механизм, состоящий из храпового колеса 1 с установленными по его обеим сторонам фрикционными накладками 2, болтов 3 и пакетов тарельчатых пружин (не показаны), обеспечивающих прижатие с постоянным усилием храпового колеса к тяговой звездочке 4 с помощью прижимного диска 5. Соосность конструкции обеспечивается центрирующим кольцом 6.

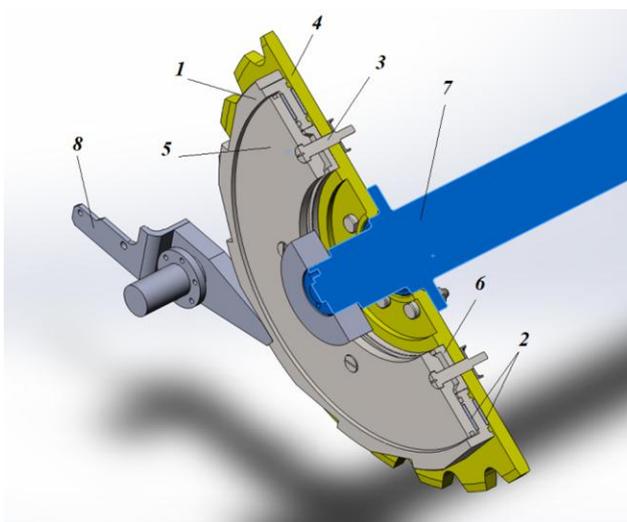


Рис. 1. Элементы аварийного тормоза тоннельного эскалатора: 1 – храповое колесо; 2 – фрикционные элементы; 3 – болт; 4 – звездочка; 5 – прижимной диск; 6 – центрирующее кольцо; 7 – главный вал; 8 – собачка

При работе эскалатора за счет сил трения храповое колесо вращается вместе с главным валом 7 и тяговыми звездочками 4.

При возникновении нештатной ситуации, механизм аварийного тормоза активируется упором, состоящим из электромагнита, толкателя с пружиной и собачки 8, которая взаимодействует с зубом храпового колеса. За счет действия сил трения между фрикционными накладками, прижимным диском и звездочкой осуществляется торможение полотна.

Конструкция аварийного тормоза такова, что поверхности фрикционных накладок, звездочки и нажимного кольца в процессе эксплуатации находятся в непосредственном контакте и неподвижны друг относительно друга в течение длительного времени. Это приводит к возникновению диффузии материалов и, при наличии факторов, способствующих коррозии материалов, к схватыванию поверхностей фрикционного диска, звездочки и нажимного кольца [6].

Схватывание может быть вызвано различными процессами физического или химического межмолекулярного взаимодействия, в частности диффузией, образованием Ван-дер-Ваальсовых связей, взаимным окислением материалов и др. Как правило, перечисленные процессы проявляются при плотном контактировании поверхностей неподвижных друг относительно друга деталей, что характерно для узлов аварийного тормоза эскалатора. Характерной особенностью эксплуатации эскалаторов является попадание растворов солей и антигололедных реагентов с входных площадок эскалаторов. Это интенсифицирует процессы деструкции и окисления материалов, а значит и скорость диффузии. В результате протекания химических реакций и рассмотренных выше процессов между материалами контактирующих поверхностей образуется слой, который по своим характеристикам может иметь как меньшую, так и большую прочность в сравнении с контактирующими материалами. Для оценки влияния схватывания фрикционных элементов эскалатора будем рассматривать второй случай как наиболее опасный, так как при этом в момент срабатывания аварийного тормоза будет разрушаться материал фрикциона, непосредственно прилегающий к области схватывания.

Критерием образования связей между контактирующими элементами является характерное изменение в них структуры векторного поля ускорений, представленное на рис. 2. Указанные изменения возможно отслеживать путем установки системы акселерометров.

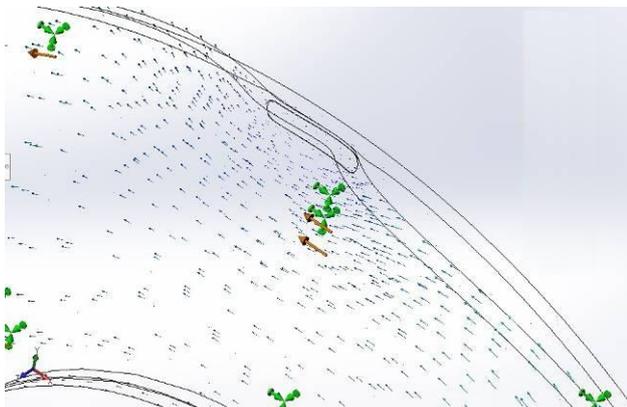


Рис. 2. Векторное поле в области контакта диска и фрикционной накладки

Практика эксплуатации тоннельных эскалаторов показывает, что вероятность развития схватывания увеличивается при чрезмерном затягивании гаек, регулирующих сжатие тарельчатых пружин. Это объясняется тем, что при увеличении сжатия тарельчатых пружин увеличивается сила, с которой контактные поверхности диска и тормоза прижимаются друг к другу. Явление схватывания существенно изменяет картину динамических процессов взаимодействия сопряженных элементов, возникающих при работе аварийного тормоза. В частности, схватывание способствует увеличению изгибающих моментов, действующих на стяжные болты, а также росту тангенциальных напряжений, поскольку после отрыва схватившихся поверхностей относительная скорость контактировавших элементов изменяется скачкообразно. Кратковременность процессов и высокий градиент силовых факторов могут стать причиной каскадного разрушения болтового соединения звездочки и нажимного кольца и, как следствие, выхода тормоза из строя и неуправляемого движения лестничного полотна.

Отметим, что, несмотря на важность данного устройства в обеспечении надеж-

ности и безопасности эксплуатации всего эскалатора, его напряженное динамическое состояние изучено недостаточно и рассматривалось, как правило, только с точки зрения статических нагрузок. Ввиду указанного обстоятельства, выполненное в настоящей статье исследование динамических процессов и напряженно-деформированного состояния узла болтового соединения звездочки и нажимного кольца тоннельного эскалатора в трехмерной нестационарной постановке с учетом влияния диффузии материалов контактных поверхностей является актуальным.

Целью настоящей работы является установление влияния степени схватывания контактирующих поверхностей фрикционов, а также уровня загрузки тоннельного эскалатора на напряженно-деформированное состояние болтового соединения звездочки и нажимного кольца в процессе аварийного торможения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Построение математической модели аварийного тормоза, позволяющей выполнять анализ динамических процессов в указанной системе с учетом нагрузки эскалатора при различной площади схватывания контактных поверхностей.
2. Моделирование процесса торможения эскалатора при полной нагрузке и в режиме движения без нагрузки.
3. Оценка влияния площади схватывания контактных поверхностей, а также степени загрузки эскалатора на величину усилий в болтовых соединениях звездочки и нажимного кольца.
4. Разработка и реализация детализированной модели, позволяющей более полно оценивать характер деформации болтового соединения в процессе приложения пиковых нагрузок в момент срабатывания аварийного тормоза эскалатора.

2. Постановка задачи

Моделирование аварийных и штатных режимов работы аварийного тормоза выполняется в нестационарной постановке. Ввиду

сложности геометрии и большого числа контактирующих узлов, для решения поставленной задачи был использован конечно-элементный пакет Comsol Multiphysics [7]. Моделирование процесса аварийного торможения выполнено с помощью модуля многотельной динамики (Multibody Dynamics) в нестационарной постановке. Его использование позволяет с достаточной точностью определить картины распределения сил, скоростей и моментов, действующих на отдельные узлы тормоза.

При выполнении моделирования приняты следующие допущения и упрощения:

1. Материал элементов является однородным и изотропным.

2. Вал, звездочка, нажимное и центрирующие кольца являются соосными. Перемещение нажимного кольца и храповика осуществляется строго параллельно оси вала. Биение отсутствует. Опоры главного вала являются абсолютно жесткими.

3. Распределение усилий от тарельчатых пружин равномерное. Перекос, вызванный неравенством затяжек болтов 3 (рис. 1) отсутствует.

4. Ось вращения собачки совпадает с осью вала, на котором она располагается. Собачка совершает только вращательное движение. Вал является недеформируемым телом.

5. Деформации вала, храповика, звездочки, нажимного и центрирующего колец незначительны. Указанные тела рассматриваются как недеформируемые.

6. Учет влияния второй звездочки, главного вала, ступеней, приводного двигателя и других движущихся механизмов эскалатора учитывается путем соответствующего изменения момента инерции звездочки 4. Это позволяет редуцировать модель и снизить ее размерность. При этом предполагается, что звездочка 4 совершает только вращательное движение относительно оси главного вала.

7. Болты, соединяющие звездочку и нажимное кольцо, располагаются соосно отверстиям в нажимном кольце. Считаем, что взаимное перемещение болта относительно оси отверстия нажимного кольца пренебрежимо мало. Болты перемещаются вокруг оси

вращения главного вала с той же скоростью, что и нажимное кольцо.

8. Все отверстия и валы в начальный момент времени являются цилиндрическими.

9. Материал болтов имеет следующие характеристики [8]: Модуль Юнга 2×10^9 Па, коэффициент Пуассона 0.31, предел текучести 785 МПа, модуль пластичности 1,5 ГПа.

10. Влияние гравитации пренебрежимо мало.

11. Деформации подчиняются закону Гука. Пластические деформации отсутствуют.

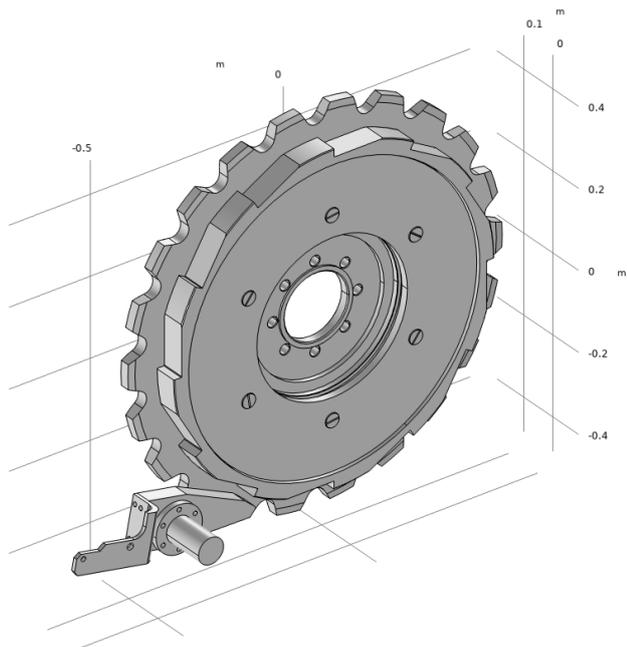
12. Фрикционные накладки моделируются в виде сплошных дисков и считаются эластичными. Коэффициент трения фрикционов по стальной поверхности – 0,4 [9].

Общий вид модели аварийного тормоза, построенной с использованием принятых допущений, представлен на рис. 3, а. Узлы, рассматриваемые как линейно деформируемые тела, представлены на рис. 3, б.

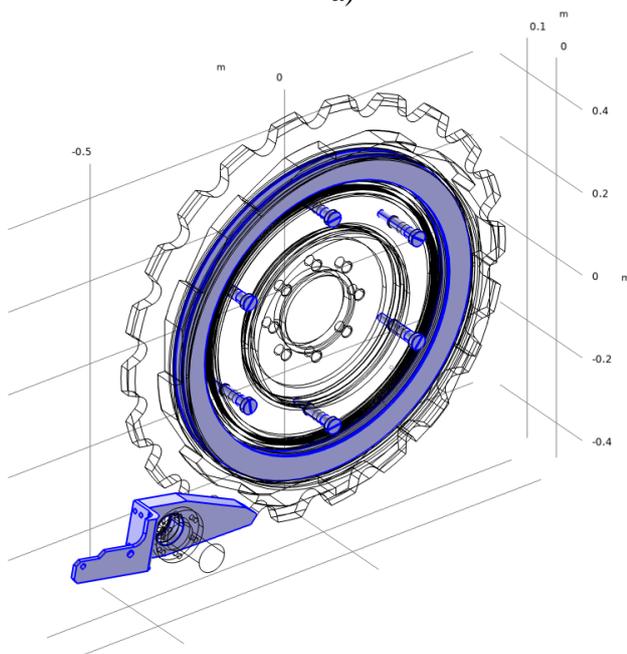
3. Результаты расчета динамических процессов

В ходе исследования были выполнены расчеты динамического режима торможения ненагруженного и нагруженного эскалатора при поверхности схватывания от 0,5 до 5% общей площади контакта звездочки и нажимного диска с тормозными накладками. В качестве примера на рис. 4 приведен результат динамического расчета процесса аварийного торможения ненагруженного эскалатора.

Также с помощью инструментов пост-процессорной обработки Comsol был рассчитан тормозной путь эскалатора (0,69 м), а также среднее ускорение торможения ($0,44 \text{ м/с}^2$). Полученные результаты были сопоставлены с параметрами аварийного торможения, указанными в руководстве по эксплуатации эскалатора ЭС-04 и в федеральных нормах и правилах «Правила безопасности эскалаторов в метрополитенах» [10], а также результатами натуральных испытаний эскалатора ЭС-04. Выявлено удовлетворительное совпадение результатов моделирования, эксперимента и требований [10].



а)



б)

Рис. 3. Редуцированная модель аварийного тормоза: а – общий вид, б – узлы, рассматриваемые как линейно-деформируемые тела (выделены цветом)

С целью дальнейшей верификации математической модели выполнен анализ временных зависимостей проекций вектора ускорения на оси X, Y, Z, полученных в результате эксперимента на эскалаторе ЭС-04 и с помощью разработанной математической модели. Проекции вектора ускорения при численном исследовании рассчитаны с по-

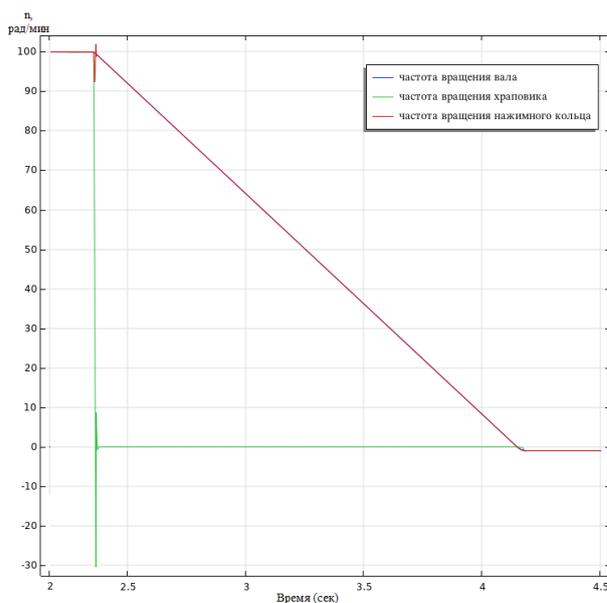


Рис. 4. Графики изменения частоты вращения главного вала (кривая 1), храповика (кривая 2) и нажимного кольца (кривая 3) при аварийном торможении ненагруженного эскалатора

мощью встроенного инструмента probe (датчик). Экспериментальные и расчетные зависимости ускорений представлены на рис. 5.

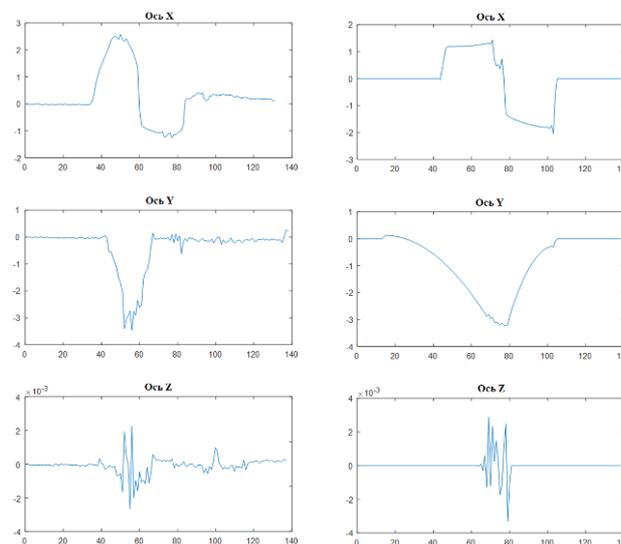


Рис. 5. Результаты экспериментального (левый столбец) и численного (правый столбец) определения проекций вектора ускорения

На рис. 6 приведены скалограммы обработки зависимостей проекций вектора ускорения с помощью вейвлет-преобразования.

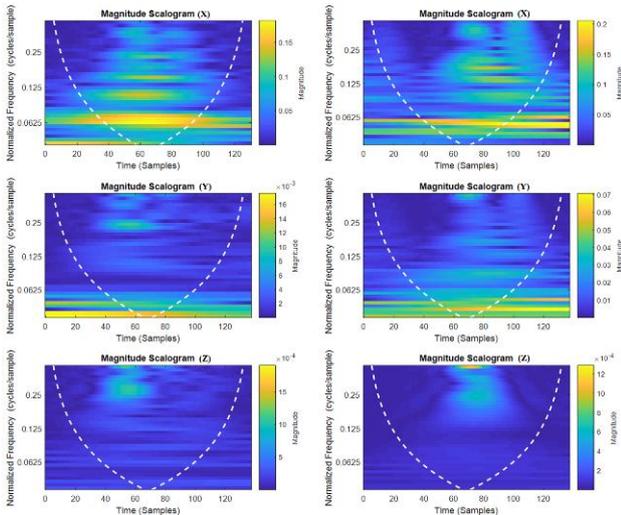


Рис. 6. Результаты обработки с помощью вейвлет-анализа данных экспериментального (левый столбец) и численного (правый столбец) определения проекций вектора ускорения

Видно, что временные зависимости проекций вектора ускорения в достаточной степени совпадают качественно. Результаты вейвлет-анализа показывают наличие удара по отведению Z. Энергетический отклик в целом идентичен. Отличия объясняются принятыми допущениями о жесткости опор при выполнении и построении математической модели.

В процессе исследования режима аварийного торможения было исследовано напряженно-деформированное состояние стяжных болтов и определялось максимальное напряжение на их поверхностях. В результате выполненного исследования процесса аварийного торможения выявлено, что в момент удара храпового колеса о стопор аварийного тормоза происходит кратковременное динамическое возмущение, вызванное необходимостью преодоления сил трения покоя между фрикционными накладками и тормозными поверхностями аварийного тормоза. Это сопровождается резким увеличением напряжений в болтах в зоне выхода из отверстий нажимного диска, а также в зоне контакта болта и центрирующего кольца. В качестве иллюстрации к сказанному на рис. 7 представлены эпюры распределения напряжений на поверхностях стяжных болтов, полученные в начале процесса торможения нагру-

женного эскалатора после удара храпового колеса о стопор.

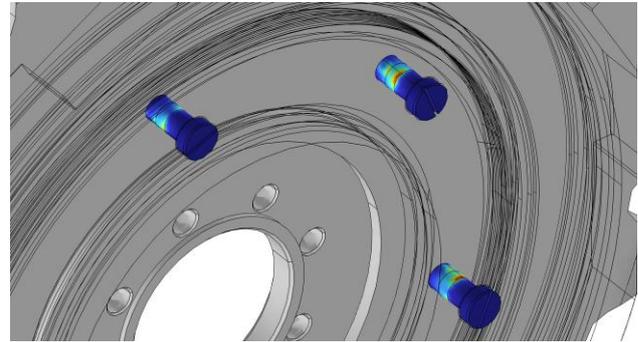


Рис.7. Эпюры распределения напряжений в стяжных болтах в начале процесса торможения нагруженного эскалатора после удара храпового колеса о стопор

Значения максимальных напряжений, полученные для каждого из шести стяжных болтов, с помощью инструмента probe, для случая торможения нагруженного эскалатора при отсутствии схватывания фрикционных поверхностей, представлены на рис. 8.

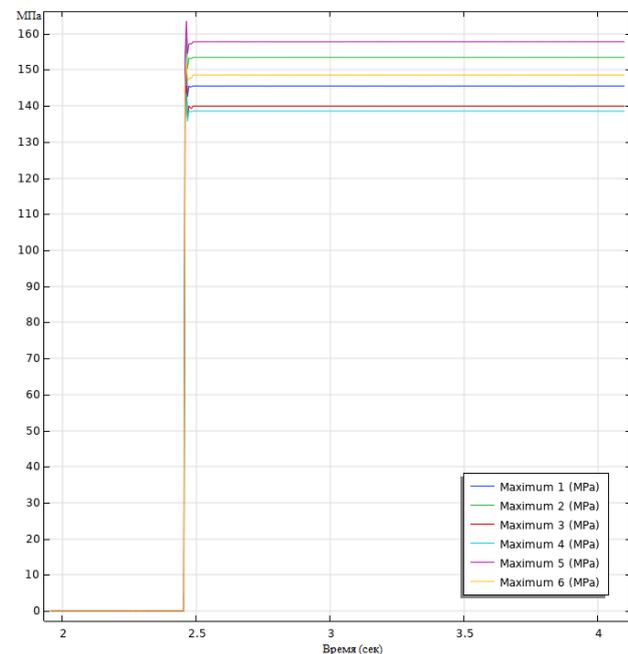


Рис.8. Графики изменения (время) максимальных напряжений на стяжных болтах пакетов пружин при аварийном торможении нагруженного эскалатора

Выявлено, что нагрузка на болты является неравномерной. После удара храпового колеса о стопор возникающие динамические

процессы и увеличение напряжений носят пиковый характер. Отметим, что в случае отсутствия схватывания напряжения, возникающие в стяжных болтах, не превышают предела прочности и текучести, а значения ускорений лестничного полотна не превышают значений, указанных в [10]. При этом величина затяжки пакета тарельчатых пружин (до 1,5 кратного от номинального значения) оказывает слабое влияние на величину ускорения и максимальные значения напряжений на поверхностях болтов.

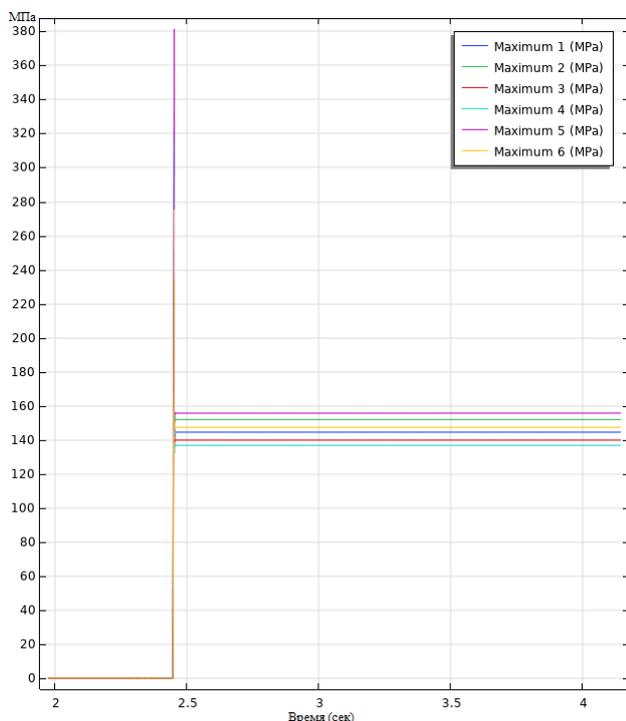


Рис.9. Графики изменения максимальных напряжений на стяжных болтах пакетов пружин при аварийном торможении эскалатора с площадью схватывания фрикционных накладок, составляющим 1% от общей площади тормозных накладок

Выполненное исследование влияния схватывания на величину максимальных динамических нагрузок показало, что при схватывании более 0,5% общей площади фрикционных накладок к тормозной поверхности, величина напряжений в стяжных болтах при ударе храпового колеса о стопор превышает предел прочности материала на срез (280 МПа), а при схватывании более 3,5% площади величина напряжений превышает предел текучести материала (785 МПа). Это может

привести к каскадному разрушению болтов и неконтролируемому движению лестничного полотна. В качестве примера на рис. 9 представлены графики изменения максимальных напряжений на стяжных болтах пакетов пружин при аварийном торможении нагруженного эскалатора, полученные при наличии схватывания фрикционных, площадь которого составляет 1% от общей площади тормозных накладок.

Для оценки влияния площади схватывания фрикционных на максимальное значение напряжений на поверхности болтов построена зависимость максимального значения напряжения от площади схватывания, представленная на рис. 10.

Видно, что при увеличении площади схватывания от 0,5 до 5% общей площади контакта величина пикового напряжения увеличивается по линейному закону. Таким образом, ввиду высокой вероятности разрушения стяжных болтов, необходимо предусматривать комплекс профилактических мероприятий, препятствующих развитию процесса схватывания в процессе эксплуатации эскалаторов, оборудованных аварийными тормозами рассмотренной выше конструкции. Болты при этом подвержены значительным ударным нагрузкам в сочетании со сложным характером деформаций.

В результате выполненных расчетов выявлено, что болт движется по сложной траектории, причем его движение сопровождается изгибом и поворотом по всем трем осям. При этом наблюдается увеличение амплитуды контактных напряжений. Наибольшие значения имеют составляющие, направленные вдоль оси X. Остальные составляющие напряжений в 5...10 раз ниже. Выявлено, что в момент времени, предшествующий заклиниванию, в некоторых точках зоны контакта болта и нажимного кольца превышен предел текучести (785 МПа для стали 40X). Контактное взаимодействие при этом носит кратковременный характер. В качестве примера на рис. 11 представлены зависимости пикового значения проекции напряжения на ось X.

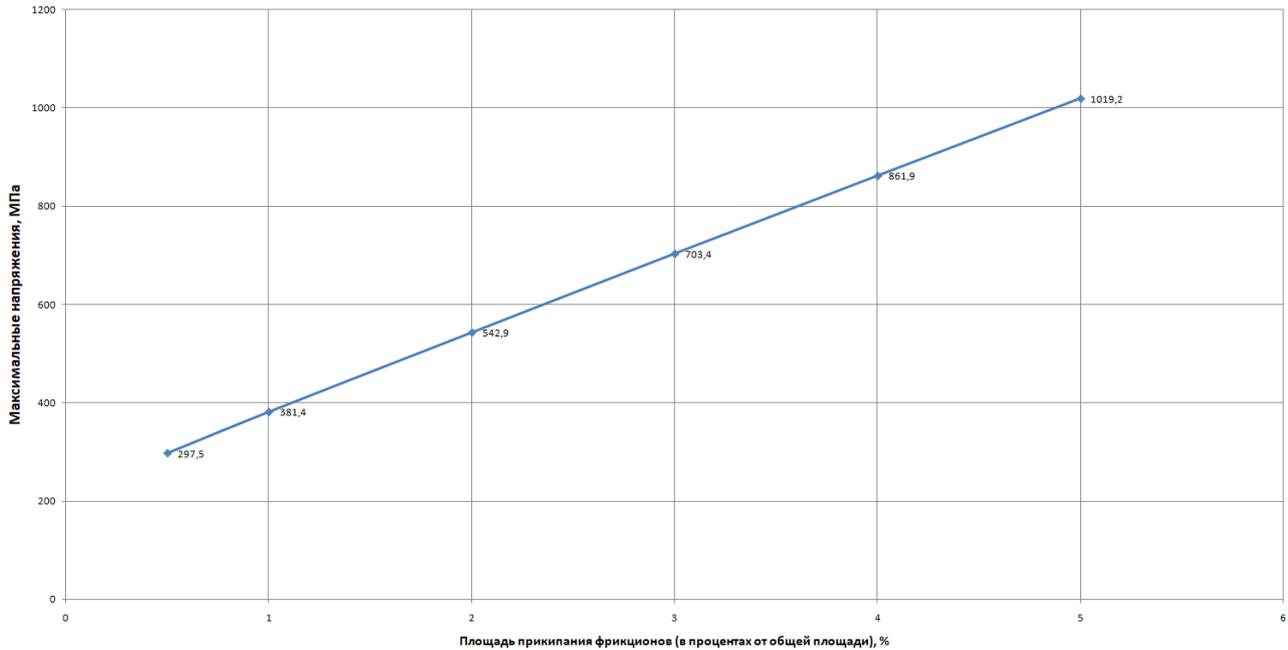


Рис.10. Зависимость величины пиковых значений напряжения на поверхности стяжных болтов, от площади схватывания тормозных накладок.

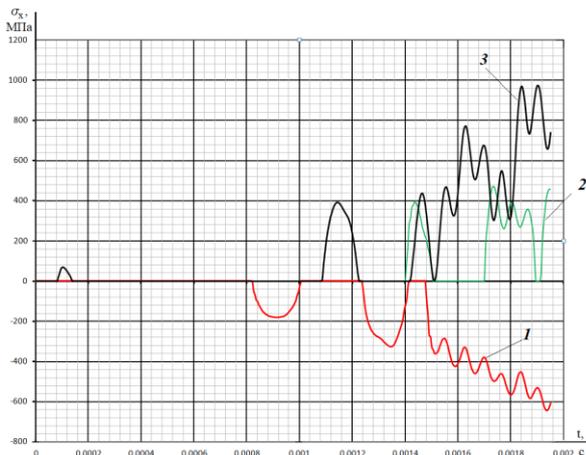


Рис.11. Зависимости пиковых значений проекций контактных напряжений на ось X: 1 – на поверхности отверстия звездочки; 2 – на поверхности отверстия центрирующего кольца; 3 – на поверхности отверстия нажимного кольца

В результате расчета выявлено, что защемление болта и, как следствие, восприятие нагрузок звездочкой и нажимным кольцом происходит несинхронно, превышение предела текучести приводит к образованию наклепа на поверхности материала болта и отверстий, а также появлению локальных зон выкрашивания материала, что подтверждается опытом эксплуатации (рис. 12). Отчет-

ливо видны зоны наклепа и выкрашивания вследствие появления зон локального превышения предела прочности и текучести.



Рис.12. Повреждения стяжного болта пакетов пружин при нештатных условиях работы аварийного тормоза

5. Заключение

Разработана и реализована в программном пакете Comsol Multiphysics математическая модель аварийного тормоза, позволяющая выполнять анализ динамических процессов с учетом нагрузки эскалатора, а также математическая модель, позволяющая выполнять детализированное исследование ха-

рактера деформаций болтов, удерживающих в прижатом состоянии нажимной диск, храповое колесо и звездочку, в процессе работы аварийного тормоза после соударения храповика и собачки.

Произведена оценка влияния нештатных условий работы аварийного тормоза на динамические параметры торможения и на величину усилий, передающихся на болтовые соединения.

Выявлено, что процесс торможения сопровождается неравномерным распределением нагрузки на стяжные болты. После удара храпового колеса о стопор возникающие динамические процессы и увеличение напряжений носят пиковый характер. При этом наиболее опасным для работы системы аварийного торможения является процесс диффузии материалов контактных поверхностей. Установлено, что зависимость пикового значения напряжения на поверхности болтов от площади схватывания поверхностей носит линейный характер. Так при схватывании 0,5% площади контакта, напряжения в стяжных болтах превышают допускаемые значения на срез (280 МПа), а при 3,5% пло-

щади – превышают предел текучести материала (785 МПа). При отсутствии диффузии напряжения не превышают допустимых значений, а влияние силы затяжки контактных пружин на величину указанных напряжений незначительно.

Выявлено, что в процессе торможения болт движется по сложной траектории, причем его движение сопровождается перемещением по всем трем осям и увеличением амплитуды контактных напряжений. Наибольшие значения имеют составляющие, направленные вдоль оси X. Остальные составляющие напряжений в 5...10 раз ниже.

Выявлено, что процесс защемления болта, а значит и восприятия нагрузок звездочкой и нажимным кольцом происходит не синхронно. Происходит увеличение количества контактов ударного типа. При этом в некоторых точках зоны контакта болта и нажимного кольца превышен предел текучести (785 МПа для стали 40X). Также превышен предел прочности на срез, что сопровождается образованием наклепа и локальным выкрашиванием материала.

Список литературы

1. Бардышев О.А., Попов В.А., Филин А.Н. О безопасности эскалаторов в метрополитенах // Вестник МАНЭБ. 2018. Т. 23, № 3. С. 10-14.
2. Ватулин Я.С., Попов В.А., Козлов М.Н. Оценка рисков при эксплуатации тоннельных эскалаторов, оборудованных аварийным тормозом с постоянным моментом // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. № 2. С. 201-210.
3. Ватаев А.С., Ватулин Я.С., Орлов С.В., Воробьев А.А., Никитин В.В. Численное моделирование динамики нагружения шарнирных соединений рабочего оборудования фронтального погрузчика // Строительные и дорожные машины. 2023. №3. С. 22-32.
4. Ватулин Я.С., Чуюн С.Н., Попов В.А., Орлов С.В. Исследование экстремальных режимов работы транспортных систем

References

1. Bardyshev O.A., Popov V.A., Filin A.N. About the safety of escalators in subways. *Vestnik MANEB*, 2018, Vol. 23, No.3, pp. 10-14. (In Russian)
2. Vatulin Ya.S., Popov V.A., Kozlov M.N. Risk assessment during the operation of tunnel escalators equipped with a constant-torque emergency brake. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No. 2, pp. 201-210. (In Russian)
3. Vataev A.S., Vatulin Ya.S., Orlov S.V., Vorob`ev A.A., Nikitin V.V. Numerical simulation of the loading dynamics of the articulated joints of the working equipment of the front loader. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 2023, No. 3, pp. 22-32. (In Russian)
4. Vatulin Ya.S., Chuyan S.N., Popov V.A., Orlov S.V. Investigation of extreme modes of operation of transport systems by means of SolidWorks Motion. *Sistemy*

