

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ

УДК 656.22

О. С. ЧАГАНОВА, кандидат технических наук, Ю. И. КУЛАЗЖЕНКО, доктор физико-математических наук, М. Ю. СТРАДОМСКИЙ, младший научный сотрудник, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ СДВИГА ВАГОНОВ, ЗАКРЕПЛЕННЫХ ТОРМОЗНЫМИ БАШМАКАМИ

В течение периода с августа 2017 по ноябрь 2019 года на станции Орша-Центральная был проведен ряд экспериментов по определению сил, необходимых для сдвига вагонов, закрепленных тормозными башмаками. Для оценки параметров, влияющих на способность тормозных башмаков удерживать состав, была построена многофакторная регрессионная модель. Получено, что максимальные величины сил, способствующих уходу вагонов, определяются массой поезда и продольным профилем железнодорожного пути, на котором размещен состав поезда. Выполненный анализ позволил установить пути возможного совершенствования правил крепления составов поездов тормозными башмаками.

Одним из важнейших вопросов, связанных с безопасностью движения поездов на железнодорожном транспорте, является обеспечение надежного закрепления подвижного состава для предотвращения его самопроизвольного ухода со станционных путей. В настоящее время закрепление вагонов в сортировочном парке и торможение вагонов на горках малой мощности осуществляется с помощью тормозных башмаков, которые обеспечивают торможение за счет замены трения качения колеса по рельсу трением скольжения полоза башмака и другого неподбашмаченного колеса по рельсам.

Исследования в области применения тормозных башмаков производятся в различных направлениях. В работе [1] описаны основные причины самопроизвольного ухода вагонов со станции и сделан вывод о том, что значимой причиной ухода вагонов является продольный профиль станционных путей. Авторы работ [2–4] рассматривали движение подбашмаченной колесной пары по рельсам как совокупность подсистем на уровне узлов трения: полз тормозного башмака – рельс, полз башмака – колесо, колодка башмака – колесо и колесо – рельс. Ими была получена модель процесса движения колесной пары на башмаке в зависимости от внешних и внутренних факторов. Также были проведены исследования влияния размера ползуна на характер разрушения круток катания колес, имеющих на поверхности катания характерные повреждения в виде ползуна. Результаты исследования позволили скорректировать классификацию ползунов по геометрическим размерам, дающую представление о степени их влияния на срок службы колесных пар. Авторы статьи [5] провели анализ технических средств регулирования скорости продвижения вагонов вдоль сортировочных путей и закрепления подвижного состава от самопроизвольного движения на наклонных участках пути и указали направления их совершенствования. Результаты взаимодействия вагона и башмака, характеризующего сложным колебательным процессом башмака, который содержит как низкочастотную, так и высокочастотную составляющие изменения осевых усилий, были представлены в работе [6]. В работах ученых ВНИИЖТа [7–10] анализируются результаты испытаний железнодорожных горочных башмаков повышенной прочности и облегченной конструкции в сравнении с серийными башмаками.

Числов О. Н. и Ильин А. М. в работах [11, 12] развивают методику расчета норм закрепления подвижного состава с целью учета влияния различных факторов и разработки методики расчета закрепления составов поездов, состоящих из разнородного подвижного состава, на неко-

торых продольных профилях станционных путей. Методика позволяет производить расчет количества тормозных башмаков в зависимости от выбора вариантов их укладки под определенные вагоны. Также проведено сравнение норм закрепления, определенных на основании действующей и предлагаемой к рассмотрению методики. Предложено решение проблемы отсутствия четких норм закрепления подвижного состава, состоящего из вагонов различной длины. Сформулированы направления повышения надежности и эффективности закрепления на станционных путях поездов и отдельно стоящих вагонов с минимизацией человеческого фактора и регламентацией расчета норм закрепления.

Анализ современных исследований по креплению железнодорожных составов на станционных путях выявил, что данный вопрос актуален из-за несовершенства существующих нормативных документов. Цель представленной работы – анализ факторов, определяющих количество башмаков, которое необходимо для крепления состава.

С августа 2017 по ноябрь 2019 года на станции Орша-Центральная НИЛ УПП БелГУТа был проведен ряд экспериментов по определению влияния различных факторов на усилия, возникающие при креплении подвижного состава тормозными башмаками, предназначенными для предотвращения самопроизвольного ухода вагонов. Были рассмотрены варианты с различными числом вагонов в составах поездов, их осевой нагрузкой, состояниями рельсов при разном числе используемых башмаков.

Для построения многофакторной регрессионной модели на основании экспериментальных данных о значениях сил, возникающих при креплении железнодорожных составов с помощью тормозных башмаков на станционных путях, и методики, описанной в [13], был выбран предварительный перечень параметров, потенциально влияющих на способность тормозных башмаков удерживать состав. В их число вошли: время года (T), в течение которого проводилось данное испытание; скорость ветра ($V_{вет}$, м/с); наличие атмосферных осадков и замасленность рельсов (O_c); температура воздуха ($t_{возд}$); общая масса поезда ($Q_{брутто}$, т); отношение массы груза к массе поезда ($Q_{нетто} / Q_{брутто}$); длина поезда ($m_{учл}$); количество вагонов в поезде (m); количество тормозных башмаков ($n_{баш}$); сила сжатия поезда (P , кН). В качестве выходного параметра на начальном этапе статистической обработки принято отношение сжатия поезда к числу тормозных башмаков ($P / n_{баш}$), использованных для удержания состава на пути.

Рассмотрена взаимная связь входящих в модель факторов для исключения искажения результатов моделирования в результате дублирования их влияния на функцию отклика. Были определены факторы, имеющие высокую степень взаимной корреляции между собой (с коэффициентом корреляции $r > 0,75$) [13, 14]. Анализ результатов расчета показал, что в рассматриваемом перечне факторов наибольшую степень корреляции с принятой функцией отклика $P/n_{\text{баш}}$ (отношение сжатия поезда к числу башмаков) имеют следующие факторы: сила сжатия поезда (P , кН), время года (T), в течение которого проводилось данное испытание, температура воздуха ($t_{\text{возд}}$), а наименьшее – скорость ветра ($v_{\text{ветр}}$, м/с). Между собой в наибольшей степени коррелируют факторы: количество вагонов поезда и длина поезда ($r(m; m_{\text{усл}}) = 0,929522$), время года и температура воздуха ($r(T; t_{\text{возд}}) = 0,881978$). В соответствии с описанными выше рекомендациями из числа факторов исключены $m_{\text{усл}}$ и T , так как они обладают меньшим коэффициентом корреляции с функцией отклика $P/n_{\text{баш}}$, чем факторы m и $t_{\text{возд}}$ соответственно.

В дальнейших исследованиях были использованы следующие параметры: P ($r = 0,585979$), $t_{\text{возд}}$ ($r = 0,205268$), O_c ($r = -0,068329$), $Q_{\text{брутто}}$ ($r = -0,046866$), m ($r = -0,027913$), $n_{\text{баш}}$ ($r = 0,017992$), $Q_{\text{нетто}}/Q_{\text{брутто}}$ ($r = -0,015978$), $v_{\text{ветер}}$ ($r = -0,013049$), для большинства которых коэффициент корреляции по сравнению с зависимой переменной оказался значительно меньше 0,75. При построении многофакторной регрессионной модели сочетание параметров и их влияние друг на друга могут дать улучшение коэффициента корреляции.

Далее были построены однофакторные модели, которые позволили оценить рассматриваемые параметры по степени их влияния на отношение силы сжатия поезда к числу тормозных башмаков. Значимость однофакторных моделей определялась на основании полученных зависимостей и коэффициента множественной корреляции [15]

$$R^2 = \frac{SSR}{SST}, \quad (1)$$

где SSR – сумма квадратов, соответствующая уравнению регрессии; SST – полная сумма квадратов.

Для оценки доли общего разброса, которая объясняется построенной регрессией, используется коэффициент детерминации

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-q-1} (1 - R^2). \quad (2)$$

Для оценки адекватности регрессионной модели используется F -критерий, который определяет отношение дисперсии оценки модели к дисперсии остатка [15]

$$F = \frac{SSR/q}{SSE/(n-q-1)}, \quad (3)$$

где SSE – сумма квадратов остатков, равная разности между числом различных опытов и числом констант, найденных по этим опытам независимо друг от друга.

Результаты расчета указанных выше параметров при определении удерживающей силы, приходящейся на один башмак, показали, что полученная степень взаимной корреляции между усредненным отношением силы сжатия поезда к числу башмаков, является недостаточной при учете всех влияющих параметров многофакторной модели. Значения коэффициента детерминации при добавле-

нии влияющих параметров изменяются от $R^2 = 0,329$ до $R^2 = 0,484$, а величина отношения дисперсии оценки модели к дисперсии остатка – от $F = 166,9872$ до $F = 39,031$. В связи с этим сделан вывод о нецелесообразности использования данного показателя в качестве функции отклика при построении многофакторной модели.

Расчеты сдвигающей силы, в соответствии с методикой, описанной в [16], показали, что при разработке норм крепления следует отталкиваться от значения равнодействующей сил тяжести и сил сопротивления движению поезда. Проведен расчетно-статистический анализ экспериментальных результатов по креплению составов различной длины и массы на станционных путях.

Для дальнейших исследований при построении многофакторной модели в качестве функции отклика была выбрана сдвигающая сила, действующая на состав поезда, стоящего на пути (рисунок 1).

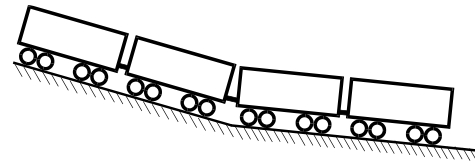


Рисунок 1 – Схема установки состава поезда на пути станции

Сдвигающая сила [17] определяется разницей проекции силы тяжести поезда на ось пути и силой сопротивления

$$P_{\text{сдвиг}} = Q_{\text{брутто}} g \sin \alpha - W, \quad (4)$$

где $\sin \alpha$ равен среднему уклону рассматриваемого пути в промилле; W – сила сопротивления движению состава, Н, которая в соответствии с Правилами тяговых расчетов [18] определяется выражением

$$W = \sum_{j=1}^k W_j = \sum_{j=1}^k w_{oj}'' Q_{\text{ваг}} g, \quad (5)$$

$Q_{\text{ваг}}$ – масса одного вагона; w_{oj}'' – основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов.

Для построения многофакторной регрессионной модели были предварительно выбраны параметры, потенциально влияющие на способность башмаков удерживать состав: скорость ветра ($v_{\text{ветер}}$, м/с); наличие атмосферных осадков и замасленность рельсов (O_c); температура воздуха ($t_{\text{возд}}$); общая масса поезда ($Q_{\text{брутто}}$, т); отношение массы груза к массе поезда ($Q_{\text{нетто}}/Q_{\text{брутто}}$); количество вагонов в поезде (m); количество тормозных башмаков ($n_{\text{баш}}$); сила сжатия поезда (P , кН). В качестве выходного параметра была принята сдвигающая сила ($P_{\text{сдвиг}}$, Н).

В соответствии с описанными выше рекомендациями из числа факторов было исключено количество вагонов в поезде m , так как он обладает меньшим ($r = 0,621148$) коэффициентом корреляции с функцией отклика $P_{\text{сдвиг}}$, чем фактор $Q_{\text{брутто}}$ ($r = 0,978834$). Далее были рассмотрены параметры: $Q_{\text{брутто}}$ ($r = 0,978834$), $Q_{\text{нетто}}/Q_{\text{брутто}}$ ($r = 0,436238$), $t_{\text{возд}}$ ($r = -0,246298$), $n_{\text{баш}}$ ($r = 0,190006$), O_c ($r = -0,170138$), $v_{\text{ветер}}$ ($r = -0,141084$), P ($r = 0,139181$), для большинства которых коэффициент корреляции по сравнению с зависимой переменной (сдвигающая сила) оказался значительно меньше 0,75. Значения коэффициента детерминации при добавлении влияющих параметров изменяются от $R^2 = 0,959$ до $R^2 = 0,988$, а величина отношения дисперсии оценки модели к дисперсии остатка от $F = 8321,699$ до $F = 4115,440$.

На рисунке 2 представлен нормальный вероятностный график распределения остатков для оценки адекватности модели. Отметим, что наибольшие остатки соответствуют случаям, при которых башмаки были размещены на замасленных и мокрых рельсах.

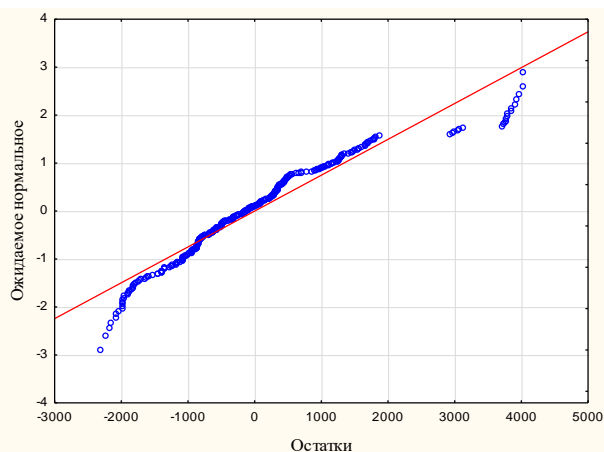


Рисунок 2 – Нормальный вероятностный график остатков

Использование многофакторных регрессионных моделей оценки влияния различных параметров на сдвигающую силу, действующую на группу вагонов, позволяет оптимизировать нормирование закрепления состава тормозными башмаками, причем следует отталкиваться от значения равнодействующей сил тяжести и сил сопротивления движению поезда.

Таким образом, подтверждено, что максимальные величины сил, способствующих уходу вагонов, которые могут возникнуть на путях размещения составов, определяются главным образом массой удерживаемого поезда и продольным профилем железнодорожного пути, на котором размещен состав поезда. Выполненный анализ позволил установить пути возможного совершенствования правил крепления составов поездов тормозными башмаками.

Список литературы

- 1 **Ташлыкова, А. И.** Основные проблемы обеспечения надежного закрепления подвижного состава на станционных путях / А. И. Ташлыкова, Е. А. Несветова // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2016. – Т. 1. – С. 226–229.
- 2 **Демьянов, Ал. Ал.** Аналитическое описание системы колесо – рельс при башмачном торможении / Ал. Ал. Демьянов, Ал. Ан. Демьянов // Качество в производственных и социально-экономических системах : сб. науч. тр. 7-й Междунар. науч.- технич. конф. – 2019. – С. 132–135.
- 3 **Демьянов, Ал. Ал.** Исследование влияния размера одно-стороннего ползуна, образуемого при движении юзом, на характер разрушения кругов катания колесных пар / Ал. Ал. Демьянов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2003. – № 2. – С. 13–19.
- 4 **Демьянов, Ал. Ал.** Исследование характера поврежденной поверхности катания колесных пар / Ал. Ал. Демьянов,

Ал. Ан. Демьянов // Наука XXI века: вызовы и перспективы : материалы межрегиональной науч.-практ. конф. – 2019. – С. 394–398.

5 **Берент, В. Я.** Снижение повреждаемости колес вагонов на сортировочных горках / В. Я. Берент, А. В. Николаев, И. П. Старшов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2009. – № 2. – С. 34–39.

6 **Водяников, Ю. Я.** Исследования динамической нагруженности горочного башмака при взаимодействии с подвижным составом / Ю. Я. Водяников, Л. С. Ольгард, А. В. Гречко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – № 11. – С. 141–147.

7 Железнодорожные тормозные горочные башмаки: история и перспективы / С. А. Сапожников [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – № 5. – С. 38–43.

8 Расширенные эксплуатационные испытания железнодорожных тормозных горочных башмаков новой конструкции / М. В. Забавина [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2015. – № 4. – С. 33–38.

9 Стояночные тормозные башмаки для закрепления подвижного состава на станционных путях. Полигонные испытания / Д. П. Марков [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – Т. 75. – № 5. – С. 308–317.

10 Стояночные тормозные башмаки. Эксплуатационные испытания / Марков Д. П. [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76. – № 3. – С. 153–158.

11 **Ильин, А. М.** Многовариантная верификационная методика расчета норм закрепления подвижного состава на железнодорожных путях станций / А. М. Ильин, О. Н. Числов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3. – С. 115–123.

12 **Числов, О. Н.** Расчет норм закрепления составов поездов на станционных приемоотправочных путях в условиях переменных параметров подвижного состава и продольного профиля / О. Н. Числов, А. М. Ильин, О. И. Вережкина // Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов : междунар. сб. науч. тр. ; под общ. ред. А. К. Головнича. – Гомель : БелГУТ, 2019. – С. 129–136.

13 **Френкель, С. Я.** Многофакторная модель расхода энергоресурсов в пассажирском движении / С. Я. Френкель, А. П. Дединкин, Р. К. Гизатуллин // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2011. – № 1 (22). – С. 103–106.

14 **Кобзарь, А. И.** Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М. : Физматлит, 2006. – 816 с.

15 **Стукач, О. В.** Программный комплекс Statistica в решении задач управления качеством : учеб. пособие / О. В. Стукач. – Томск : Томск. политехн. ун-т, 2011. – 163 с.

16 **Shimanovsky, A. O.** Investigation of the longitudinal track profile influence on the forces acting in the train inter-car connections using the MSC.ADAMS software / A. O. Shimanovsky, P. Sakharau // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – Vol. 2353. – P. 555–569.

17 **Chaganova, O. S.** Fastenings parameters determination for highly deformative cargo, taking into account its durability during transportation in cars and trains / O. S. Chaganova, I. A. Varazhun // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2018. – Vol. 7, no. 3. – P. 218–222.

18 Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М. : Транспорт, 1985. – 287 с.

Получено 20.10.2021

O. S. Chaganova, Yu. I. Kulazhenko, M. Yu. Stradomsky. Test's results analysis for determining forces needed to displace cars fixed with skids.

During the period from August 2017 to November 2019, the experiments were carried out at the Orsha-Central station to determine the required forces needed to displace cars fixed with rail skids. A multifactorial regression model was constructed to assess the parameters that affect the rail skid ability to hold a train. It was found that the maximum forces values that cause the cars displacement are determined by the train mass and the railway track longitudinal profile where the train is located. The completed analysis made it possible to establish ways of the rules improvement for securing trains with rail skids.