

УДК 629.4.015:625.032.42:004.94

*О. В. ДЕМЬЯНЧУК, А. О. ШИМАНОВСКИЙ*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## **АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЗАКРЕПЛЕННОГО НА ПУТИ ВАГОНА С УЧЕТОМ ПОВОРОТА КУЗОВА ВОКРУГ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ**

Разработана компьютерная модель грузового вагона, изначально покоящегося на железнодорожном пути. Показано, что при смещении линии действия сдвигающей силы относительно центра тяжести вагона возникает поворот тележек. Проанализировано влияние величины сдвигающей силы и смещения линии ее действия на максимальную скорость вагона, величину его смещения и время до полной остановки.

**Ключевые слова:** грузовой вагон, сдвигающая сила, поворот тележек, компьютерное моделирование, силы трения.

Для удержания железнодорожных составов, расположенных на станционных путях, от самопроизвольного ухода находят применение различные средства закрепления, но до настоящего времени наиболее часто для этих целей как в странах СНГ, так и в дальнем зарубежье используются тормозные башмаки [1–4]. Потребное количество таких башмаков определяется в соответствии с Методическими рекомендациями [5], однако, как показывает опыт, достаточно часто количество тормозных башмаков оказывается избыточным, и, в то же время, имеют место случаи несанкционированного движения недостаточно закрепленного состава.

Авторами работ [6, 7] предложены методы решения 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. В статьях [8, 9] на основе анализа методик расчета потребного количества тормозных башмаков предложен усовершенствованный подход для определения их необходимого числа. Потребность в пересмотре существующих норм также подтверждена результатами серии испытаний, описанными в работе [10].

Научно-исследовательской лабораторией «Управление перевозочным процессом» БелГУТа были проведены испытания соответствия удерживающих сил, возникающих при закреплении подвижного состава тормозными башмаками, с целью установления факторов и условий, определяющих возможность самопроизвольного ухода вагонов [11]. В ходе ряда экспериментов, которые заключались в определении сжимающей силы, необходимой для сдвига железнодорожного состава, были получены значения соответствующих сил в случаях различной массы и длины состава при разных погодных условиях. В некоторых случаях испытания привели к неожиданным

результатам. При закреплении одного и того же состава на участках с одинаковым уклоном сила, необходимая для сдвига при одинаковом количестве тормозных башмаков, отличалась в 2 раза и более, а в некоторых случаях при сдвиге состава, закрепленного только одним тормозным башмаком, приходилось прикладывать силы, большие, чем в случае использования двух или трех средств закрепления (таблица 1).

*Таблица 1 – Результаты натурных испытаний по сдвигу состава из 10 вагонов*

Количество тормозных башмаков	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1
Сдвигающая сила, кН	117	202	71	88	137	151	73	173	232	249

Возможную причину значительного изменения сдвигающей сил не удалось установить расчетом с помощью разработанных ранее одномерных аналитических и компьютерных моделей [12, 13]. В частности, было установлено, что коэффициенты жесткости поглощающих аппаратов автосцепок и величины зазоров в межвагонных связях оказывают незначительное влияние на силу, необходимую для сдвига состава. На основе выполненного анализа было высказано предположение, что значительные расхождения с результатами натурных испытаний, наблюдаемыми в некоторых случаях, могут быть связаны с увеличением сил сопротивления движения, возникающим вследствие возможного поворота кузова и тележек вагона вокруг вертикальной оси, который может наблюдаться при сжатии состава.

Анализ публикаций по динамике железнодорожного подвижного состава при его пуске в ход показал, что исследователями рассматривается начало движения при размещении локомотива в голове поезда, которое связано с растяжением поезда [14–18]. В таком случае продольные оси вагонов выстраиваются вдоль продольной оси пути, а эффекты, связанные с поворотом тележек и кузовов в горизонтальной плоскости, оказываются несущественными. Поэтому потребовалась разработка подхода, позволяющего адекватно описать динамику толкаемого локомотивом железнодорожного состава при выходе его из равновесия и движении при малых скоростях, что и стало целью данной работы.

Для анализа смещения изначально находящегося в покое железнодорожного вагона разработана его упрощенная модель в среде программного комплекса MSC.ADAMS, представленная на рисунке 1. В ней кузов взаимодействует с двумя тележками, представляющими собой прямоугольные параллелепипеды, через цилиндрические шарниры, оси которых вертикальны. Тележки установлены на прямолинейный горизонтальный участок железнодорожного пути. Связь между ними реализована через функцию «Contact». Чтобы учесть сопротивление качению при взаимодействии колес с рельсами, был задан коэффициент трения между нижними плоскостями моделей теле-

жек и горизонтальной поверхностью пути исходя из формул основного удельного сопротивления движению  $w_{oi}''$  грузовых вагонов [19]. Для имитации взаимодействия колес с рельсами в поперечном направлении принято, что между ними реализуется сухое трение стали по стали (коэффициент трения  $f = 0,3$ ). Несмотря на замену криволинейных поверхностей колесных пар плоскими, такая модель позволяет установить, насколько сильно взаимодействие колес с рельсами в поперечном направлении влияет на силы, препятствующие движению толкаемого вагона.

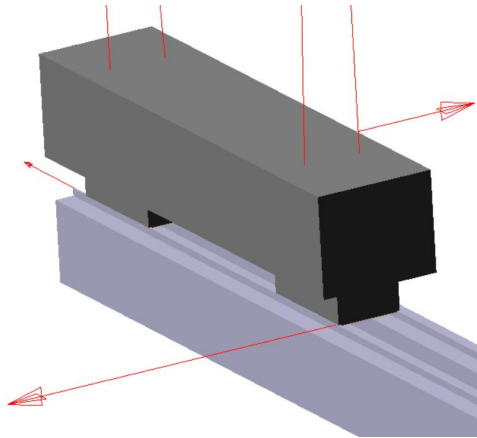


Рисунок 1 – Упрощенная модель железнодорожного вагона в среде MSC.ADAMS

По результатам аналитического расчета было установлено, что при массе вагона брутто 94 т и величине удельного сопротивления движению грузового вагона 8,28 Н/т в случае действия силы в 750 Н смещения вагона не происходит. Под действием сдвигающей силы 1000 Н, линия действия которой проходит через центр тяжести вагона, он через 1 с после начала движения приобретает постоянное ускорение (рисунок 2). Тележки и кузов не поворачиваются.

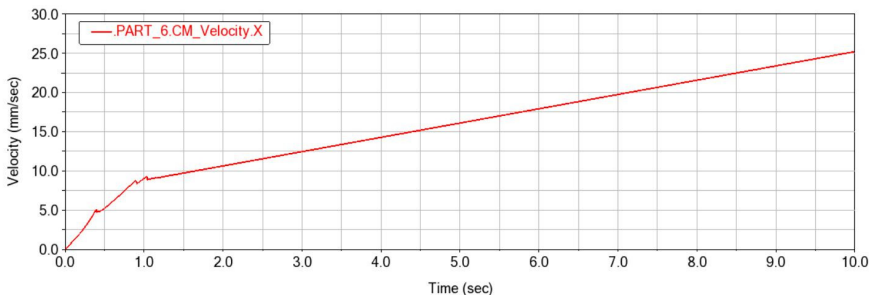


Рисунок 2 – Зависимость скорости вагона от времени при сдвигающей силе 1000 Н

Динамическое уравнение движения вагона в случае поступательного движения вагона имеет вид

$$m\ddot{x} = F_{\text{сдв}} - W,$$

где  $m$  – масса брутто вагона, кг;  $\ddot{x}$  – его ускорение,  $\text{м/с}^2$ ;  $F_{\text{сдв}}$  – сдвигающая сила, Н;  $W$  – сила сопротивления движению, Н.

Сила сопротивления движению  $W$  в соответствии с Правилами тяговых расчетов [19] определяется выражением

$$W = mgw_0'',$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

При сдвигающей силе 1000 Н расчет по приведенным формулам привел к значению ускорения 0,002  $\text{м/с}^2$ , что согласуется с результатами моделирования.

Далее было выполнено моделирование сдвига вагона под действием силы, линия действия которой смещена в поперечном направлении по отношению к продольной оси вагона. Такое смещение может быть вызвано, например, поворотом корпуса автосцепки [20].

В результате расчета, выполненного для случая смещения линии действия на 100 мм, оказалось, что через 1,1 с после начала действия сдвигающей силы, как это видно из рисунка 3, произошло значительное увеличение действующей на рельс поперечной силы. Данный факт свидетельствует о соприкосновении тележки с рельсом, сопровождающемся ударом. В дальнейшем значение этой силы уменьшается до 10 кН, что свидетельствует о сохранении контакта.

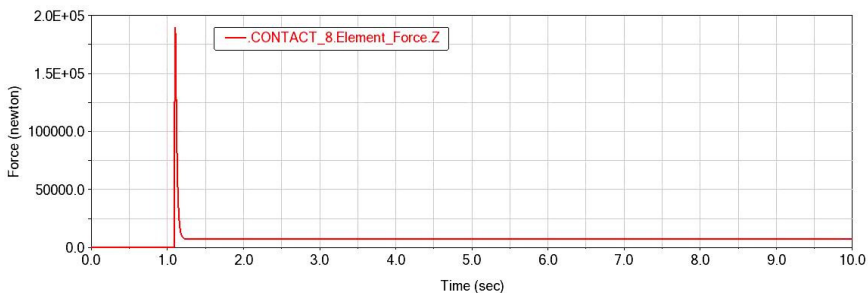


Рисунок 3 – Зависимость от времени поперечной силы, действующей на путь

Прижатие тележки к рельсу ведет к появлению дополнительных сил трения, которые ведут к остановке движущегося вагона, как это видно из рисунка 4, а. Увеличение сдвигающей силы до 5000 Н приводит к появлению на графике участка с медленно убывающей скоростью, однако и в этом случае вагон останавливается по истечении 9 с (рисунок 4, б). В случае смещения линии действия силы на большее расстояние вагон возвращается в состояние покоя быстрее (рисунок 4, в).

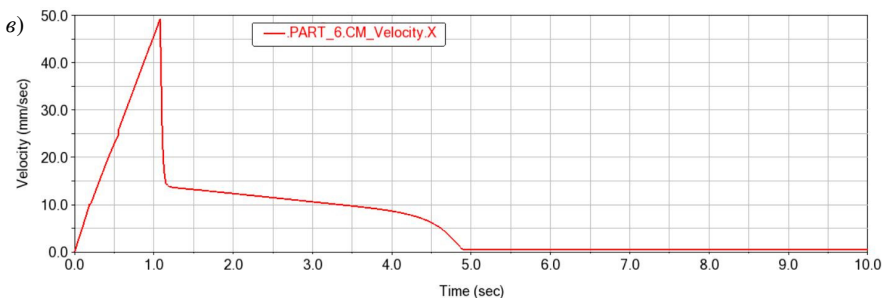
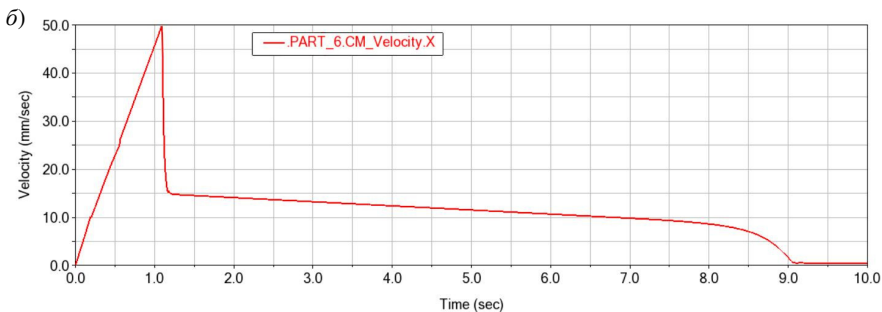
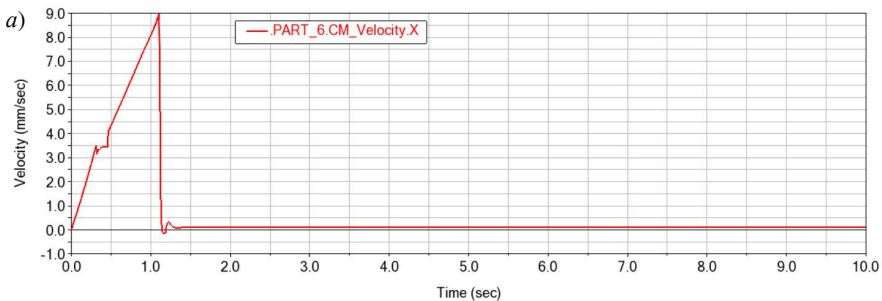


Рисунок 4 – Зависимости скорости вагона от времени при смещении сдвигающей силы от продольной оси поезда:

*a* – сила 1000 Н, смещение 100 мм; *б* – сила 5000 Н, смещение 100 мм; *в* – сила 5000 Н, смещение 400 мм

На рисунке 5 представлен график зависимости смещения вагона для случая, соответствующего рисунку 4, *в*. Он демонстрирует, что в течение 1,1 с изменение координаты центра масс кузова происходит по параболическому закону, это свидетельствует о равноускоренном движении. Затем рост перемещения значительно замедляется, а через 5 с вагон останавливается, переместившись приблизительно на 70 мм по отношению к начальному положению.

График зависимости максимальной скорости вагона от значения сдвигающей силы представлен на рисунке 6.

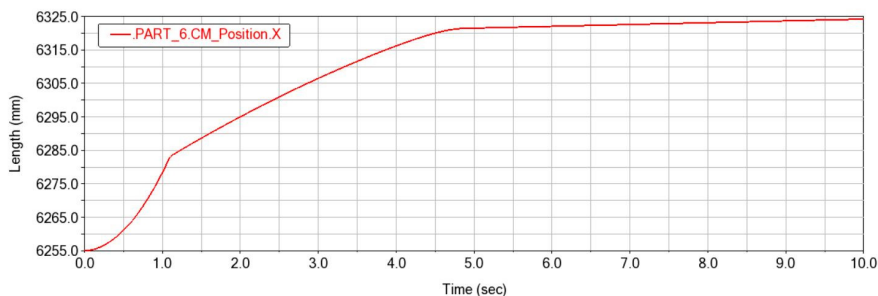


Рисунок 5 – Зависимость смещения вагона от времени при приложении сдвигающей силы 5000 Н, линия действия которой смещена на 400 мм

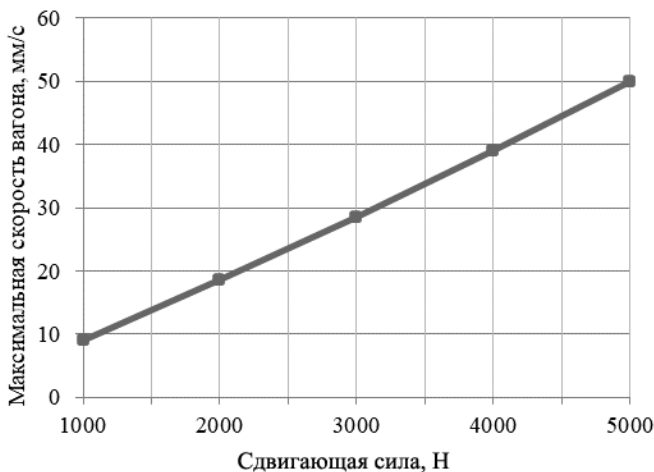


Рисунок 6 – Зависимость максимальной скорости вагона от сдвигающей силы

Максимальная скорость достигается до того момента, при котором появляется контакт между моделью тележки и рельсом в поперечном направлении, поэтому на нее не влияет смещение линии действия сдвигающей силы.

На рисунке 7 приведен график, иллюстрирующий зависимость продолжительности движения вагона до остановки от значения смещения линии действия сдвигающей силы 5000 Н. Он подтверждает, что увеличение плеча сдвигающей силы по отношению к центру масс кузова ведет к увеличению поперечной силы, действующей на рельс, а с ней – и соответствующей силы трения, что ведет к более быстрой остановке. С этим же эффектом связано и уменьшение продольного перемещения вагона, которое представлено на рисунке 8.

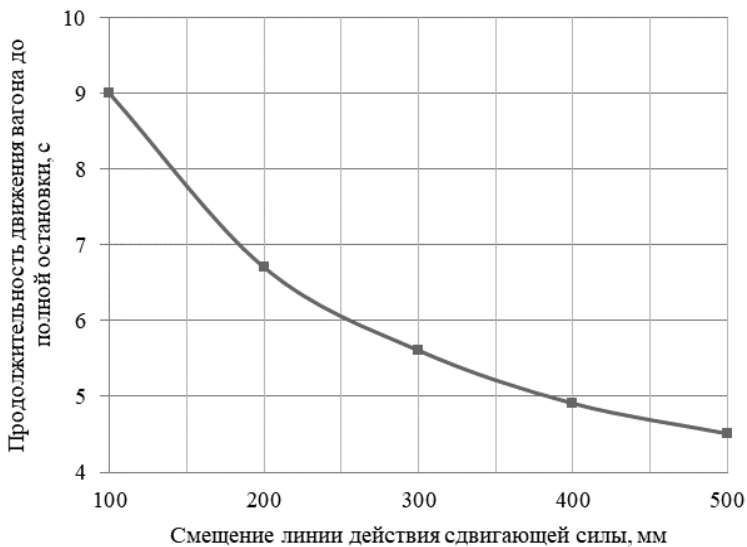


Рисунок 7 – Продолжительность движения вагона при разных значениях смещения линии действия сдвигающей силы 5000 Н

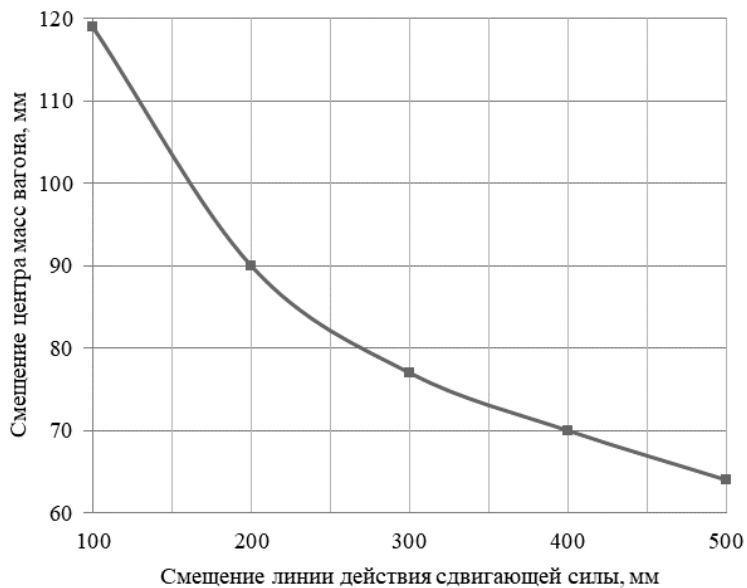


Рисунок 8 – Продольное перемещение вагона при поперечном смещении линии действия сдвигающей силы 5000 Н

Необходимо отметить, что при моделировании была использована упрощенная модель тележек. Если учесть реальную форму колес, то численные значения будут отличаться от полученных в данном случае. Однако эффект, связанный с увеличением силы трения из-за появления дополнительной поперечной силы между колесом и рельсом, будет себя проявлять.

Таким образом, разработанная компьютерная модель позволила проанализировать возможность поворота тележек, а с ним и кузова вагонов и объяснить значительный разброс сил сжатия, наблюдаемый по результатам натуральных испытаний. Установлено, что при действии на вагон сдвигающей силы, линия действия которой смещена относительно продольной оси кузова, значительно увеличивается прикладываемая сдвиговая сила, при которой вагон останавливается после начала движения. Величина смещения вагона и время до полной остановки при этом зависят от плеча приложения силы, а максимальная скорость вагона определяется только ее величиной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Пасичный, А. Н.** Обзор современных технических средств для закрепления подвижного состава на станционных путях / А. Н. Пасичный // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2. – С. 80–85.

2 Canadian Rail Operating Rules [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : <https://tc.canada.ca/en/rail-transportation/rules/canadian-rail-operating-rules>. – Дата доступа : 20.10.2022.

3 Technical Bulletin MP&E 10-01, Enforcement Guidance Regarding Securement of Equipment with Title 49 Code of Federal Regulations Section 232.103(n) [Electronic resource]. – Режим доступа : [https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra\\_net/1052/MPE1001.pdf](https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra_net/1052/MPE1001.pdf). – Дата доступа : 05.10.2022.

4 Katalog Rangiergeräte : Hemmschuhe, Radvorleger und mehr [Electronic resource]. – Saarbrücken : Knipper & Co. GmbH, 2019. – 20 s. – Режим доступа : [https://knipper.de/de/index.php?controller=attachment&id\\_attachment=526](https://knipper.de/de/index.php?controller=attachment&id_attachment=526). – Дата доступа : 05.10.2022.

5 Методические рекомендации по расчету норм закрепления подвижного состава тормозными башмаками на станционных путях станций Белорусской железной дороги. – Введ. 03.01.2006, приказ № ЗНЗ. – Минск : Белорусская железная дорога, 2021. – 59 с.

6 **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.

7 **Числов, О. Н.** Развитие автоматизированной методики расчета норм закрепления подвижного состава на станционных железнодорожных путях / О. Н. Числов, А. М. Ильин // Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление : сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. – Ростов н/Д : РГУПС, 2018. – С. 247–251.

8 **Шаталова, О. В.** Закрепление подвижного состава на железнодорожных путях станции / О. В. Шаталова, А. М. Вовк // Безопасность и охрана труда на железнодорожном транспорте. – 2017. – № 3. – С. 38–42.



9 Козаченко, Д. М. Удосконалення норм закріплення рухомого складу на станційних коліях / Д. М. Козаченко, О. М. Пасічний, Є. В. Іващенко // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2013. – № 34. – С. 119–125.

10 Козаченко, Д. М. Проблеми закріплення рухомого складу на коліях залізничних станцій / Д. М. Козаченко // Залізничний транспорт України. – 2013. – № 3/4 (100/101). – С. 69–73.

11 Чаганова, О. С. Анализ результатов испытаний по определению сил, необходимых для сдвига вагонов, закрепленных тормозными башмаками / О. С. Чаганова, Ю. И. Кулаженко, М. Ю. Страдомский // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2021. – № 2 (43). – С. 51–53.

12 Шимановский, А. О. Динамика взаимодействия вагонов с тормозными башмаками / А. О. Шимановский, М. Г. Кузнецова, О. В. Демьянчук // Транспорт шелкового пути. – 2022. – № 2. – С. 38–45.

13 Шимановский, А. О. Моделирование сдвига локомотивом железнодорожного состава, размещенного на станционных путях / А. О. Шимановский, О. В. Демьянчук // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д. (Гомель, 24–25 ноября 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 1. – Гомель: БелГУТ, 2022. – С. 192–194.

14 Попов, И. П. Математическая модель железнодорожного подвижного состава с упругодеформируемыми автосцепными устройствами в начальный момент движения / И. П. Попов // Транспорт Урала. – 2021. – № 1 (68). – С. 26–31.

15 Шимановский, А. О. Моделирование продольной динамики поезда в среде программного комплекса MSC.ADAMS / А. О. Шимановский, П. А. Сахаров, А. В. Коваленко // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Вып. 7. – С. 75–78.

16 Sharma, S. K. Impact of longitudinal train dynamics on train operations: A simulation-based study / S. K. Sharma, A. Kumar // Journal of Vibration Engineering & Technologies. – 2018. – Vol. 6, is. 3. – P. 197–203.

17 Zboiński, K. Nieliniowa dynamika pojazdów szynowych w łuku / K. Zboiński. – Radom : Wydaw. Nauk. Instytutu Technologii Eksploatacji, 2012. – 371 s.

18 Modelling, simulation and applications of longitudinal train dynamics / C. Cole [et al.] // Vehicle System Dynamics. – 2017. – Vol. 55, is. 10. – P. 1498–1571.

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

20 Shvets, A. O. Investigation of coupling strength at non-central interaction of railcars / A. O. Shvets // Strength of Materials. – 2022. – Vol. 54, is. 2. – P. 233–242.

*V. U. DZEMYANCHUK, A. O. SHIMANOVSKY*  
*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## **ANALYSIS OF A FIXED ON A TRACK CAR DYNAMICS CONSIDERING THE BODY ROTATION AROUND THE VERTICAL AXIS**

A computer model of a freight car, initially resting on a railway track, is developed. It is shown that when the shear force action line is shifted relative to the car's center of gravity, the bogies turn. There are analyzed the influence of the shear force magnitude and the displacement of its action line on the maximum velocity of the car, the magnitude of its displacement and the time to full stop.

**Keywords:** freight car, shear force, bogie rotation, computer simulation, friction forces.

Получено 31.10.2022