

УДК 629.4.015:625.032.42:004.94

О.В. Демьянчук

(УО «Белорусский государственный университет транспорта»,
г. Гомель, Беларусь)

Научный руководитель – А.О. Шимановский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ СДВИГ РАСПОЛОЖЕННЫХ НА СТАНЦИОННЫХ ПУТЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СОСТАВОВ

Рассматриваются результаты математического и компьютерного моделирования сдвига железнодорожных составов, закрепленных на путях станции тормозными башмаками. Показано, что существенным фактором, способствующим самопроизвольному движению железнодорожных составов, является действие силы давления ветра. Получены значения аэродинамических коэффициентов сопротивления вагона при различных значениях температуры окружающей среды.

Для обеспечения безопасности движения составы поездов и специальный подвижной состав, стоящие на железнодорожных путях без локомотива, должны быть надежно закреплены от ухода. В настоящее время для этого чаще всего используются тормозные башмаки [1, 2]. Практический опыт показывает, что определенное по нормам потребное их количество часто оказывается завышенным. С другой стороны, имеют место случаи ухода вагонов при закреплении составов в полном соответствии с установленными рекомендациями [3]. Анализ выполненных исследований показывает, что существует необходимость совершенствования норм крепления железнодорожного подвижного состава [4–6]. Для практического применения таких норм требуется расширенная информация о силах, сдвигающих состав, и силах сопротивления движению.

Научно-исследовательской лабораторией БелГУТа были проведены испытания соответствия удерживающих сил, возникающих при закреплении подвижного состава тормозными башмаками, влияющим факторам и условиям. Однако не все результаты испытаний удалось адекватно описать с помощью простых аналитических моделей, что связано с неполнотой учета механических характеристик вагонов. В частности, не удалось установить причины значительного различия сил,

необходимых для сдвига одного и того же состава, находящегося в одном и том же месте пути. Решение этой задачи требует выполнения анализа динамических процессов, происходящих при сдвиге состава расположенным в его хвосте локомотивом.

Появившиеся возможности по цифровой обработке информации о составах, располагаемых на железнодорожных путях, дают возможность более полного учета различных факторов при оценке потребного количества тормозных башмаков для закрепления вагонов. В представленной работе приведены результаты, полученные на основе новых математических и компьютерных моделей, позволяющих описать процессы, сопровождающие эксплуатацию подвижного состава при размещении на станционных путях.

Железнодорожный путь на станции состоит из отдельных участков, имеющих разные значения уклона продольного профиля. При установке состава поезда в пределах определенных участков пути величина уклонов может быть различна, вследствие чего изменяется и сдвигающая сила, действующая на отдельные вагоны и состав в целом.

Для анализа влияния места расположения состава на путях на силу, которую должны обеспечить тормозные башмаки для удержания состава, проведен ряд соответствующих виртуальных испытаний (рисунок 1). Результаты проведенных расчетов продемонстрировали, что для коротких составов (состоящих из менее чем 40 вагонов) перемещение состава на относительно небольшое расстояние (20–30 м) может привести к изменению силы, необходимой для удержания состава башмаками, в 2–3 раза. Если же закреплению подлежит длинный состав, то изменение необходимой для удержания силы происходит монотонно. Уровень загрузки вагонов мало влияет на вид полученных зависимостей.

В результате расчетов сделан вывод о том, что для определения потребного количества тормозных башмаков для закрепления состава можно пользоваться средним уклоном. В то же время при наличии технических возможностей целесообразно рассчитывать силы, действующие на состав, с учетом конкретного его расположения на станционных путях [7].

На основе разработанной математической модели в среде программного комплекса MSC.ADAMS создана компьютерная модель железнодорожного состава, удерживаемого от скольжения тормозными башмаками (рисунок 2). Результаты моделирования показали, что действие порывистого ветра может приводить к продольным колебаниям вагонов,

которые становятся причиной периодического смещения башмаков на несколько десятков сантиметров. Накопление таких смещений в результате многократного воздействия штормового ветра может достигать нескольких метров и приводить к выезду на пути следования поездов [8].

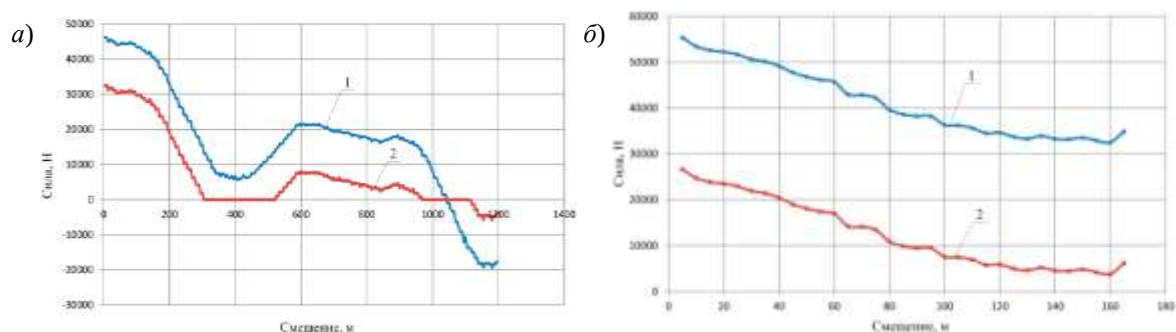


Рисунок 1 – Зависимость сил, действующих на состав, от расстояния между первым вагоном и выходным светофором:
а) 20 вагонов; б) 89 вагонов
1 – сдвигающая сила; 2 – равнодействующая сдвигающей силы и сил сопротивления

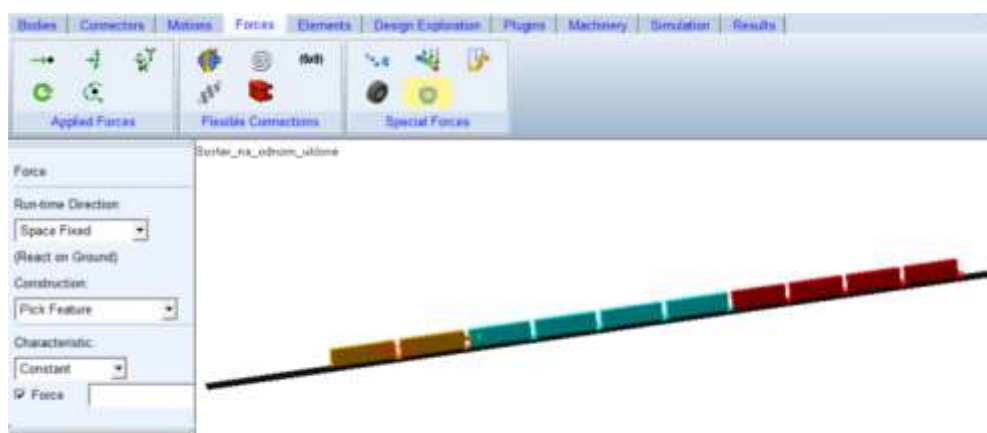


Рисунок 2 – Компьютерная модель состава поезда в среде MSC.ADAMS

Разработанная компьютерная модель также позволила исследовать влияние наличия и величины зазоров в межвагонных соединениях состава, включающего вагоны разного типа с разной величиной загрузки. Железнодорожный путь при этом был представлен в виде двух моделей: в первом случае использовалась модель, состоящая из 2 участков с разной величиной уклона, во втором – модель с усредненным уклоном.

Результаты моделирования показали, что максимальная сила, необходимая для сдвига состава, в первом случае не изменяется при увеличении зазора от 0 до 100 мм. Для второго варианта изменение максимальной сдвиговой силы при моделировании при наличии зазоров в 100 мм и при их отсутствии не превышала 3 %. Также расчеты продемонстрировали, что коэффициенты жесткости и демпфирования межвагонных соединений незначительно влияют на значения силы, которая необходима для сдвига находящегося в покое железнодорожного состава [9].

Поскольку разработанные одномерные модели не позволили установить причины значительного различия необходимых для сдвига сил, наблюдаемых при одинаковых условиях испытаний, нами создана компьютерная модель, позволяющая учитывать поворот кузова вагона в горизонтальной плоскости. В результате расчетов по ней установлено, что при смещении линии действия сдвигающей силы по отношению к 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. Таким образом, показано, что наблюдаемое в результате экспериментов значительное различие сдвиговых сил обусловлено поворотом кузова и тележек вагона в горизонтальной плоскости, которые являются случайными величинами. Наименьшее значение силы, необходимой для сдвига состава, соответствует случаю, при котором оси вагона, тележек и пути параллельны, и именно его следует принимать во внимание при совершенствовании норм закрепления подвижного состава [10].

Дальнейший анализ продемонстрировал, что наиболее существенным фактором, способствующим самопроизвольному движению железнодорожных составов, является действие силы давления ветра [11]. Наиболее подвержены уходу под влиянием силы давления ветра вагоны-хопперы. Неблагоприятный угол между результирующим вектором скорости ветра и направлением движения отцепы, при котором сила давления ветра принимает наибольшее значение, составляет для большинства типов вагонов 30° .

Рассмотрение воздействия ветровой нагрузки на составы из порожних и груженых вагонов различного типа показало, что при скорости ветра, близкой к 15 м/с, вагоны, загруженные до полной грузоподъемности, испытывают такую же сдвигающую силу, которая наблюдается при

установке тех же вагонов на путь с уклоном 2,5 ‰ в безветренную погоду. Для вагонов-хопперов такая сдвигающая сила возникает уже при скорости ветра 7,3 м/с [11]. Следует отметить, что в настоящее время укладка дополнительных тормозных башмаков предусмотрена при сильном (более 15 м/с) и очень сильном (штормовом) ветре. Выполненные исследования показали целесообразность использования при определении необходимых средств закрепления вагонов классификации ветра, используемой в гидрометеорологии, где выделяются слабый, умеренный, сильный, очень сильный и ураганный ветер [12].

Рассмотренный выше анализ выполнен на основе коэффициентов, определенных экспериментально только для основных типов железнодорожного подвижного состава. На сегодняшний день появилось значительное число усовершенствованных конструкций вагонов, для которых значения данных коэффициентов неизвестны. Для определения аэродинамических коэффициентов воздушного сопротивления движению таких вагонов нами разработаны модели их обтекания воздушным потоком в программном комплексе ANSYS CFX 2023.

Выполненное моделирование позволило определить оптимальные размеры расчетной области, позволяющие исключить ее влияние на поле воздушного потока вокруг исследуемого объекта. Также установлено, что использование модели турбулентности $k-\epsilon$ для замыкания уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, позволяет сократить время расчета в среднем на 10 % по сравнению с моделью турбулентности $k-\omega$.

Проведен анализ влияния температуры окружающей среды на коэффициент аэродинамического сопротивления. На рисунке 3 приведен график распределения скоростей потока в расчетной области при температуре окружающей среды -30° . Аналогичные схемы для других рассмотренных температур отличаются незначительно.

На основании полученных результатов моделирования определены значения коэффициента аэродинамического сопротивления C_x (таблица 1), который вычисляется по формуле

$$C_x = \frac{2F}{\rho v^2 A},$$

где F – значение силы, действующей на тело при обтекании его воздухом, Н; ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ; v – скорость потока воздуха, м/с; A – площадь поперечного сечения обтекаемого тела, м^2 .

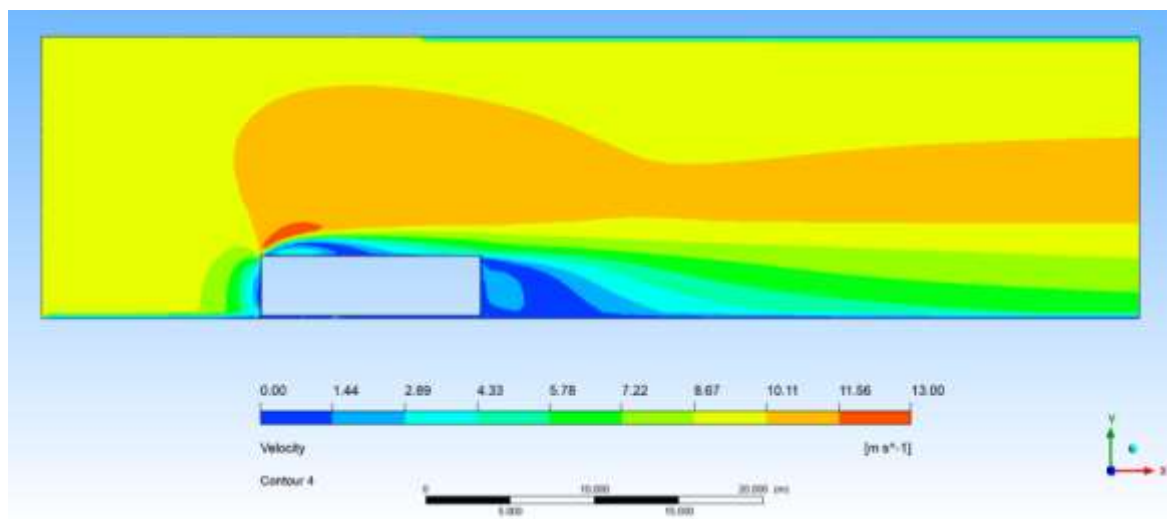


Рисунок 3 – Распределение скоростей потока в сечении расчетной области, параллельном оси железнодорожного пути, при температуре окружающей среды $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 1 – Аэродинамические коэффициенты при разных значениях температуры окружающей среды

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Плотность воздуха, кг/м^3	Сила сопротивления, Н	Аэродинамический коэффициент C_x
-30	1,4524	661,976	0,8682
-15	1,3679	623,479	0,8682
0	1,2928	589,214	0,8681
15	1,2248	558,228	0,8681
30	1,1648	530,864	0,8681
45	1,1098	505,82	0,8681

Результаты проведенных расчетов показывают, что турбулентность воздушного потока, наблюдаемая при разных температурах, не оказывает существенного влияния на значение аэродинамического коэффициента. Следовательно для анализа сил, действующих на вагон, достаточно рассмотреть его обтекание при какой-либо одной температуре воздуха, например, при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, в работе представлены результаты комплексного исследования по определению сил, действующих на железнодорожные составы при их расположении на станционных путях. Методика компьютерного моделирования обтекания вагонов воздушным потоком

позволит определять их аэродинамические характеристики без проведения сложных и дорогостоящих экспериментальных исследований. Результаты работы могут быть использованы при совершенствовании норм закрепления вагонов на станционных путях и разработке систем автоведения поездов на железнодорожном транспорте. Также они могут быть применены для совершенствования конструкций вагонов и автомобилей.

Список использованных источников:

1 Малахов, А.И. О технических средствах для закрепления подвижного состава на станционных путях / А.И. Малахов, Ю.А. Хахишвили // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2020. – №1 (42). – С. 49–53.

2 Anti-Runaway Prevention System with Wireless Sensors for Intelligent Track Skates at Railway Stations / C. Jiang [et al.] // Sensors. – 2017. – № 17(12). – 29–55.

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

4 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.

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

6 О закреплении составов стояночными тормозными башмаками / Д.П. Марков [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 12. – С. 28–30.

7 Демьянчук, О.В. Зависимость силы, требуемой для удержания поезда от ухода, от расположения состава на станционных путях / О.В. Демьянчук // Сб. студенческих научных работ в 2 ч. Ч. 1. / Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2021. – Вып. 26. – С. 119–123.

8 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.

9 Демьянчук, О.В. Моделирование сдвига железнодорожного состава с зазорами в межвагонных соединениях / О.В. Демьянчук // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XXVI Республиканской научной конференции студентов и аспирантов (Гомель, 20–22 марта 2023 года). В 2 ч. – Гомель, 2023. – Ч. 1. – С. 50–51.

10 Демьянчук, О.В. Анализ динамики закрепленного на пути вагона с учетом поворота кузова вокруг вертикальной оси / О.В. Демьянчук, А.О. Шимановский // Механика. Исследования и инновации. – 2022. – Вып. 15. – С. 83–91.

11 Демьянчук, О.В. Анализ влияния ветровой нагрузки на закрепление железнодорожных составов станционными тормозными башмаками / О.В. Демьянчук // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2021. – № 2. – С. 58–61.

12 Охрана окружающей среды и природопользование. Гидрометеорология. Правила составления краткосрочных прогнозов погоды общего назначения : ТКП 17.10-06-2008 (02120). – Введ. 01.01.2009. – Минск : Минприроды, 2008. – 34 с.

The results of mathematical and computer modeling of the shear of trains secured on the station tracks with brake shoes are considered. It is demonstrated that a significant factor contributing to the spontaneous movement of trains is the action of wind pressure. The values of the aerodynamic drag coefficients of the car were obtained at various ambient temperatures.

Сведения об авторе:

Демьянчук Ольга Владимировна, Белорусский государственный университет транспорта, механический факультет, аспирант, специальность «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация», 1 курс.

Сведения о научном руководителе:

Шимановский Александр Олегович, Белорусский государственный университет транспорта, заведующий кафедрой «Техническая физика и теоретическая механика», доктор технических наук, профессор.