

УДК 624.19

Исследование поперечной устойчивости высокоскоростного подвижного состава при выходе из тоннеля

Д. Д. Каримов, А. А. Воробьев, А. С. Ватаев, Я. С. Ватулин, К. А. Сотников

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Каримов Д. Д., Воробьев А. А., Ватаев А. С., Ватулин Я. С., Сотников К. А. Исследование поперечной устойчивости высокоскоростного подвижного состава при выходе из тоннеля // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 2. — С. 115–135. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-115-135

Аннотация

Цель: Рассмотрено численное моделирование аэродинамического взаимодействия движущегося высокоскоростного состава с ветровой нагрузкой, приложенной к боковой поверхности корпусных элементов поезда, в процессе выхода его из тоннеля на открытое пространство. Оценена устойчивость подвижного состава по критерию минимального давления весовой нагрузки на колесо. **Методы:** CFD-моделирование позволяет значительно расширить объем информации о взаимодействии подвижного состава с набегающим воздушным потоком в различных условиях окружающей среды. **Результаты:** При численном моделировании получены значения давлений на поверхности корпусных элементов состава в зонах избыточного давления и зонах разряжения. Кроме того, определены площади приложения этих нагрузок на поверхности вагона. **Практическая значимость:** Установлено, что в случае превышения скорости воздушных масс на 20% выше максимально зафиксированных на местности северо-восточного плоскогорья правобережья г. Ангрена в преобладающем направлении ветра возможно недопустимое снижение весовой нагрузки на передней тележке на левом колесе.

Ключевые слова: Аэродинамический эффект, воздушное сопротивление, высокоскоростной подвижной состав, аэродинамика, давление на поверхность, устойчивость, тоннель.

Значительную часть современного рельефа правобережья р. Чирчика (Республика Узбекистан) представляет собой равнинную зону обширной площади. Эта зона состоит из долины р. Келеса, правобережья долин рек Чирчика, Сырдарьи, а также водораздельного пространства между реками Чирчиком и Келесом [1]. Ширина правобережной части долины реки на территории г. Чирчика составляет 2–4 км и вниз по течению она становится больше, достигая в пределах города Ташкента 7–9 км, а Янгиюля — 7–8 км. Абсолютные отметки поверхности вниз по течению уменьшаются от 650 (с. Азат-Баш) до 260 м (устьевая часть) (рис. 1).

Преобладающее направление ветра на плоскогорье северо-восточное, средняя скорость ветра — 1,8 м/с [1], максимальная скорость ветра достигает 29 м/с. Согласно розе ветров формируется воздушный поток, направленный ортогонально к боковой поверхности подвижного состава при выходе на открытое пространство пути (рис. 1).



Рис. 1. Рельеф местности правобережья г. Ангрена

В технических требованиях ЕС по технико-эксплуатационной совместимости (TSI) регламентируется устойчивость подвижного состава к воздействию бокового ветра и снижению риска схода с рельсов при определенных климатических условиях на специфических участках пути, например на мостах и насыпях.

Опрокидывающий момент [2–4], образованный результирующей воздействия ветровой нагрузки, относительно участка контакта головки рельса с поверхностью катания колеса значительно снижает давление на колесные пары, а, следовательно, эффективность процесса торможения. Критерием предельного снижения давления на колесные пары является понижение в пределах 10 % распределенного веса подвижного состава [5, 6].

Качественная картина поведения потоков воздушных масс несколько отличается от результатов [7–10], получаемых в аэродинамических трубах (масштабная модель 1:15 TGV Duplex в рабочей камере аэродинамической трубы (Франция)) (рис. 2), поскольку в данном эксперименте отсутствуют предметы окружения состава, в значительной степени меняющие поведение воздушной среды после взаимодействия с препятствием.

В результате моделирования установлено характерное поведение воздушного потока, оказывающего воздействие в основном на нижнюю часть боковой поверхности подвижного состава [11, 12]. Отчетливо видны срывные потоки пониженного давления, образующиеся в результате разряжения при обтекании крыши состава и головных обтекателей.

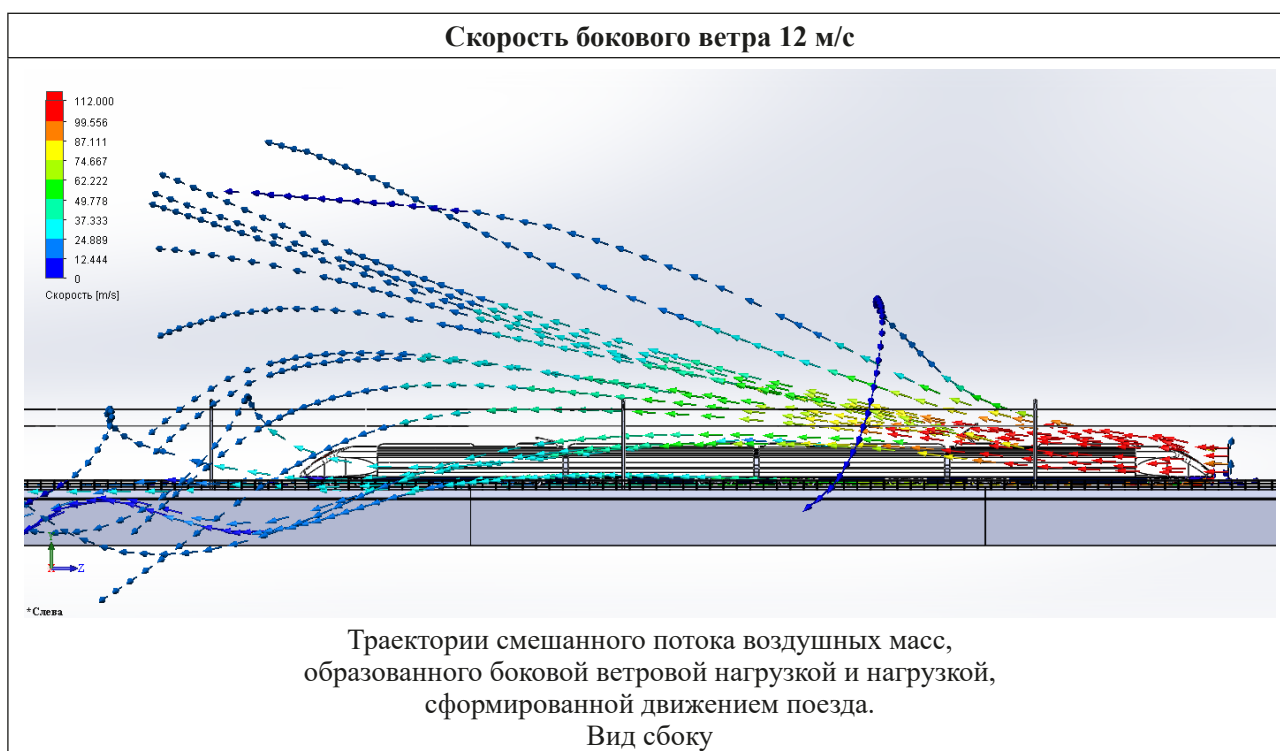
CFD-моделирование позволяет [13] значительно расширить объем информации о взаимодействии подвижного состава с набегающим воздушным потоком в различных условиях окружающей среды (табл. 1).

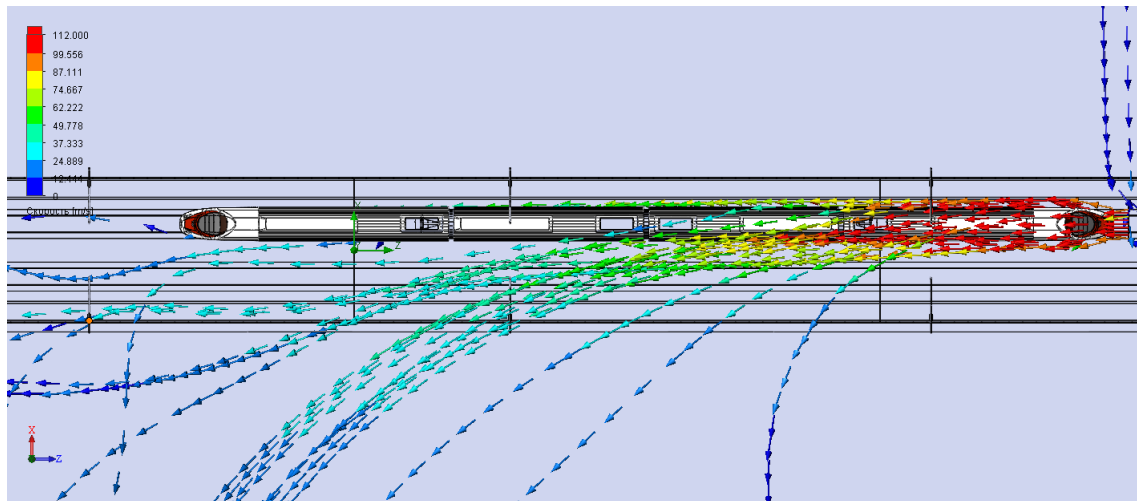


Рис. 2. Масштабная модель 1:15 TGV Duplex в рабочей камере аэродинамической трубы

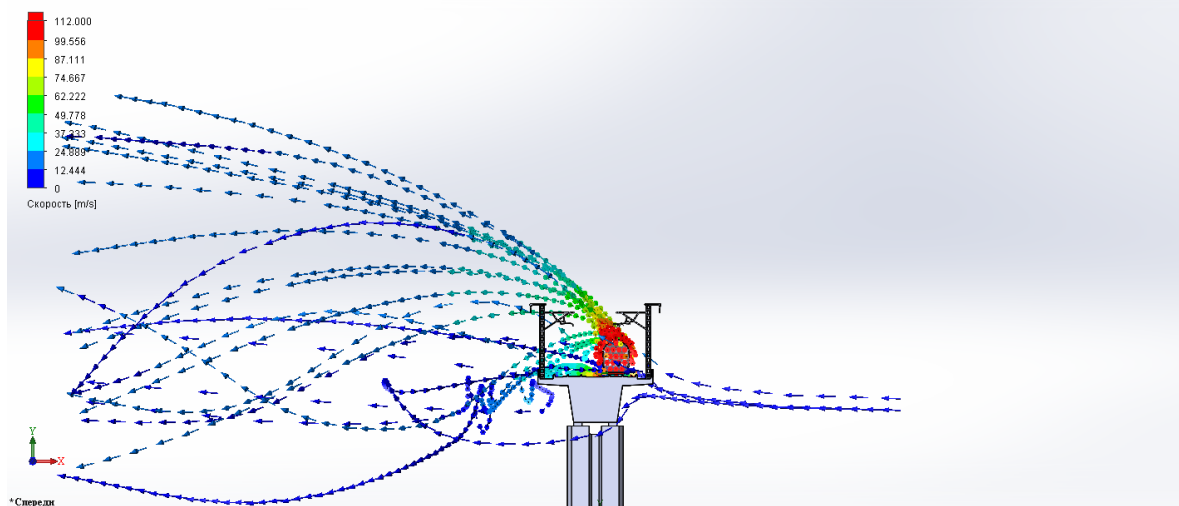
В частности, можно наблюдать явление разряжения в зоне между ограждением, опорами мачт контактного провода и корпусом состава, в результате которого поток не достигает вершины корпуса вагона, как это имеет место быть в эксперименте в аэродинамической трубе.

ТАБЛИЦА 1. Формирование структуры воздушных потоков в процессе взаимодействия инерционного наддува и бокового направления

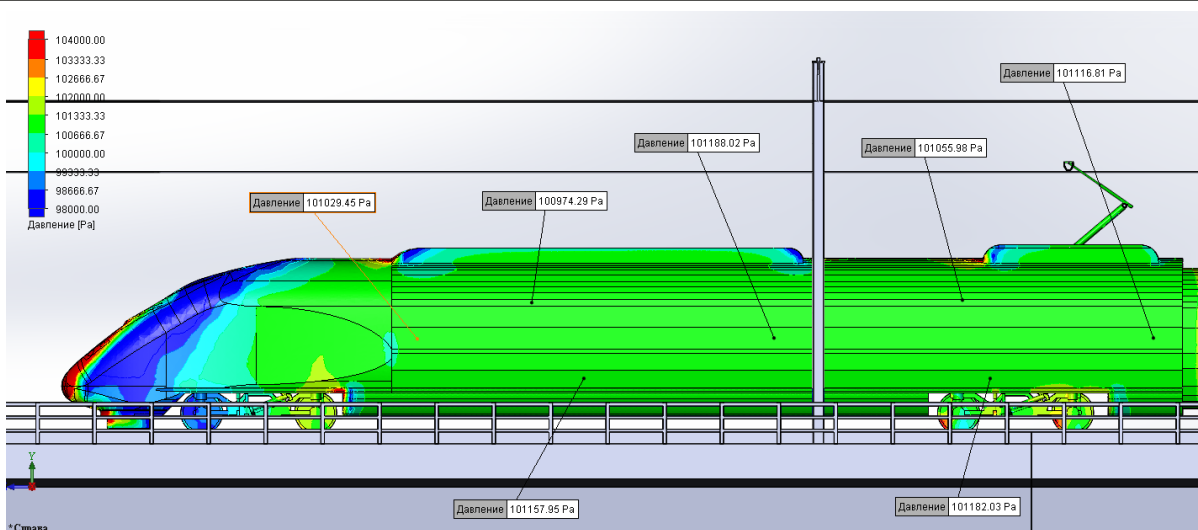




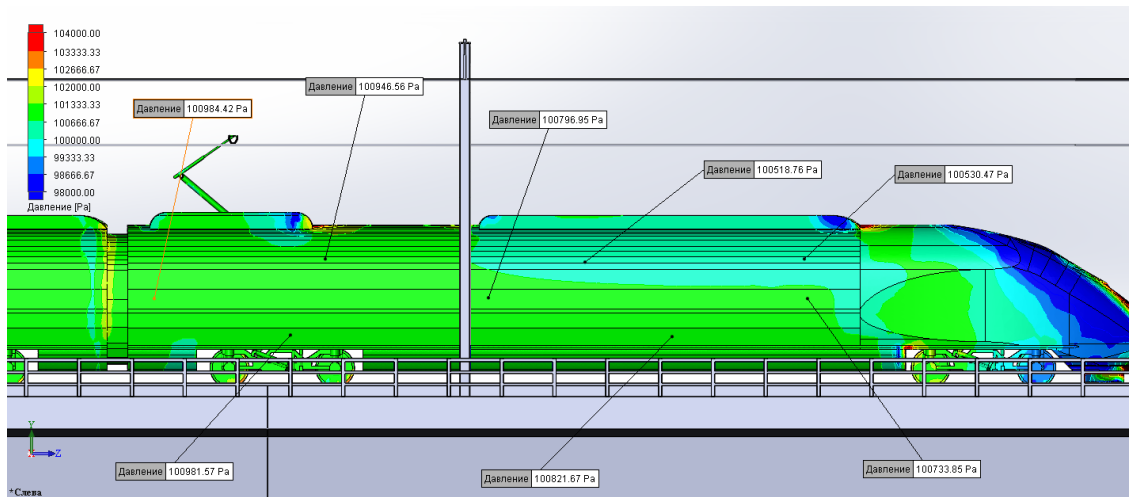
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Вид сверху



Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Сечение, вид спереди

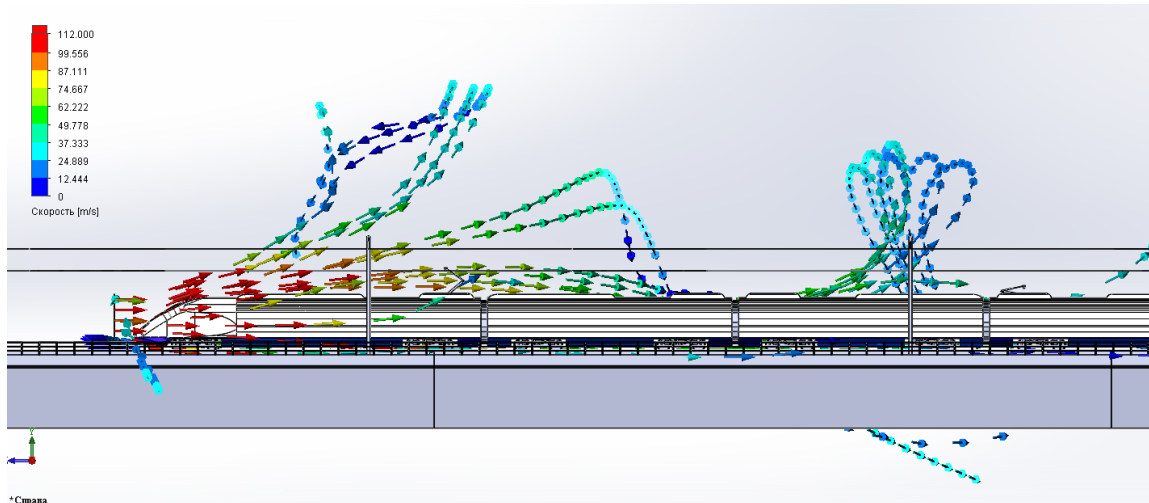


Распределение давления среды на поверхности вагона.
Наветренная сторона, головной вагон

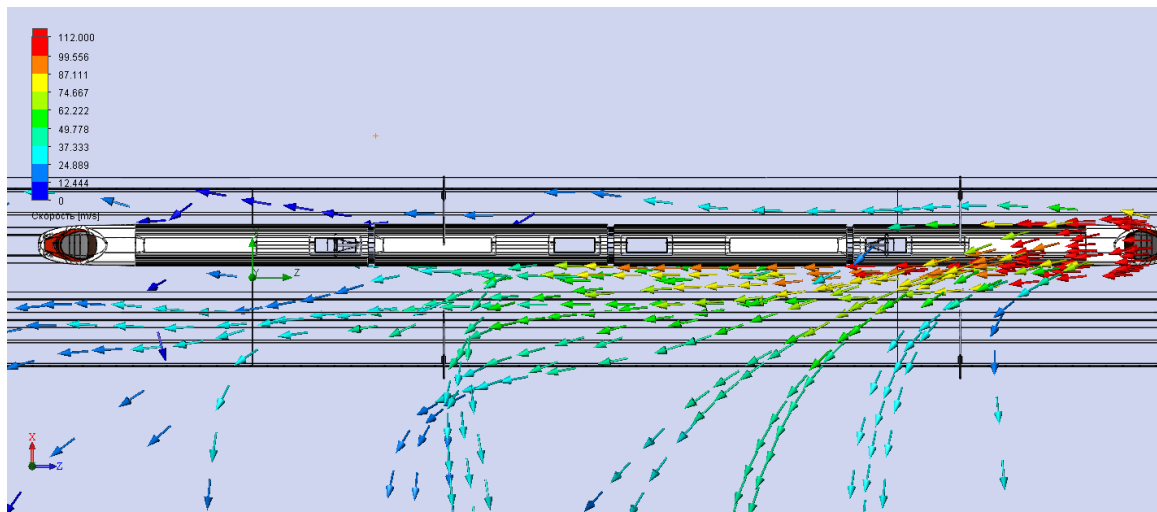


Распределение давления среды на поверхности вагона.
Подветренная сторона, головной вагон

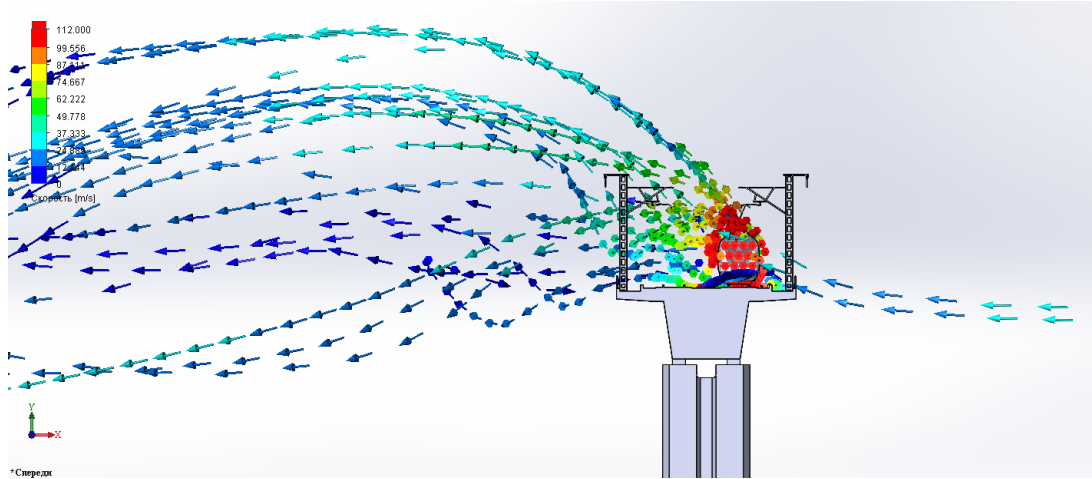
Скорость бокового ветра 29 м/с



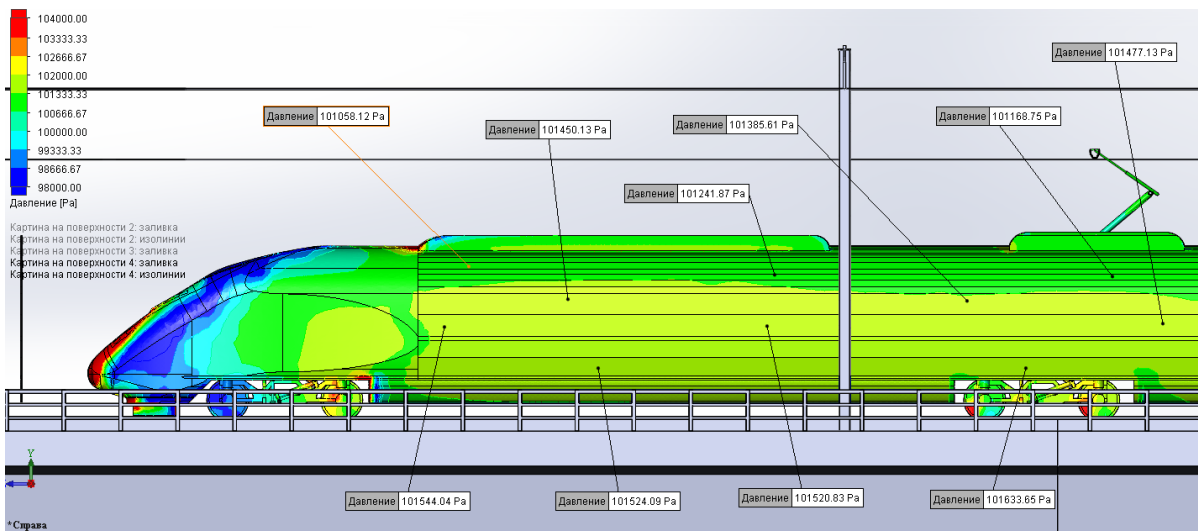
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Вид сбоку



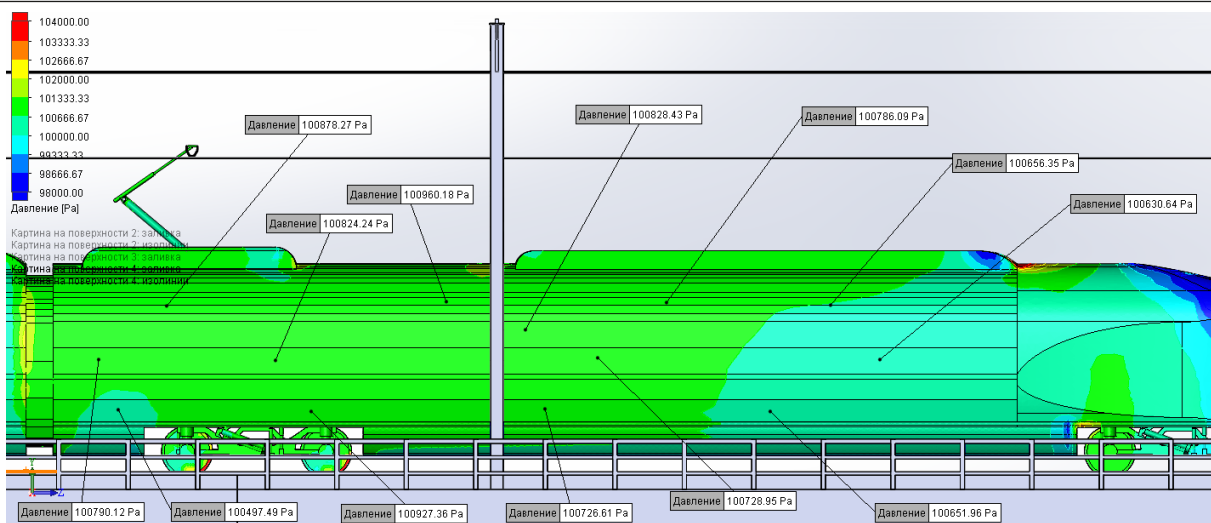
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Вид сверху



Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Сечение, вид спереди

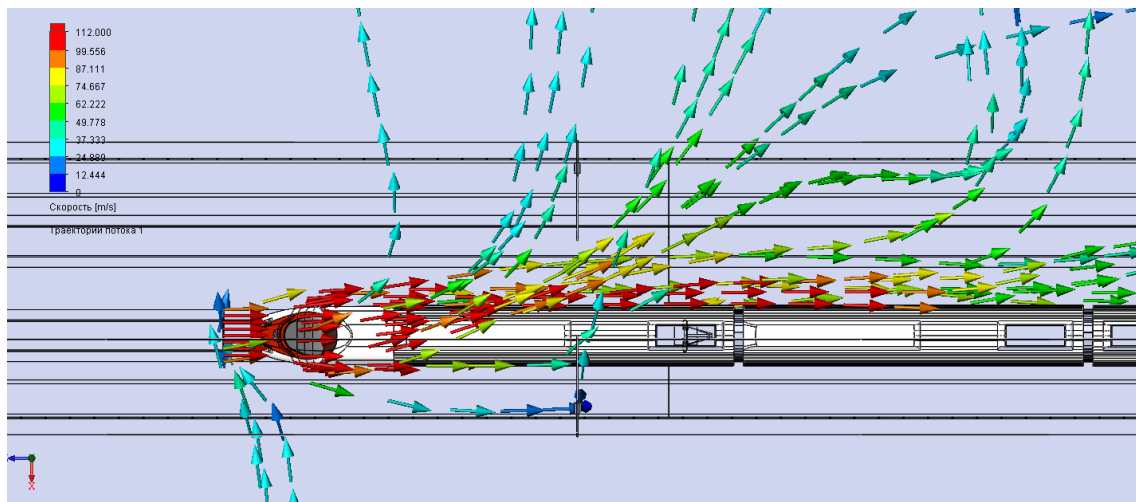


Распределение давления среды на поверхности вагона. Наветренная сторона, головной вагон

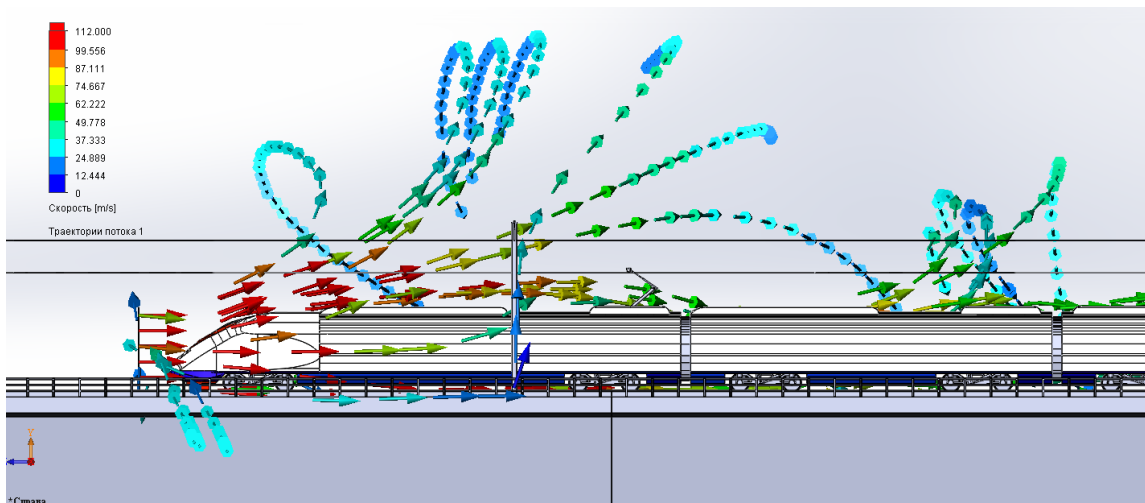


Распределение давления среды на поверхности вагона. Подветренная сторона, головной вагон

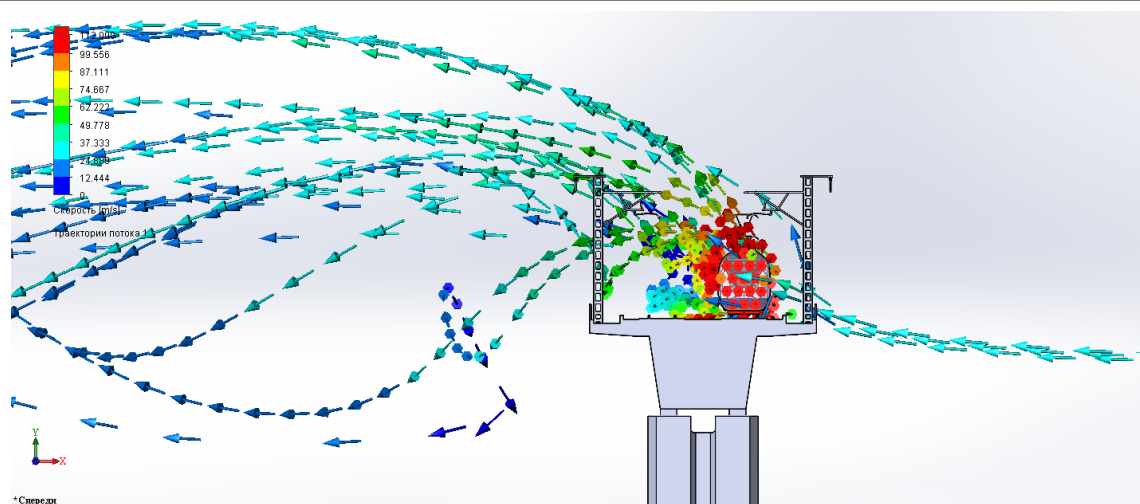
Скорость бокового ветра 36 м/с



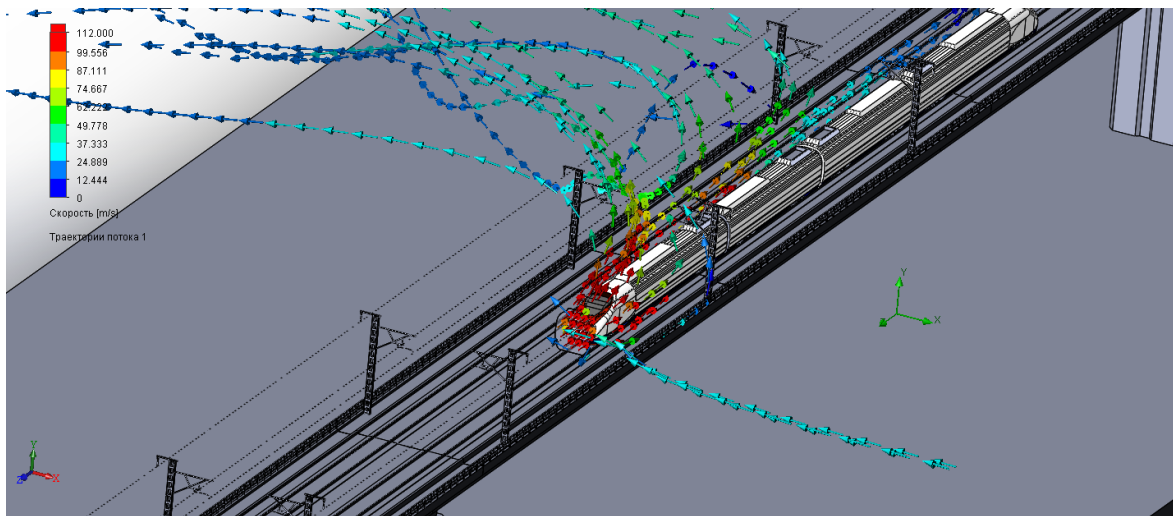
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Вид сверху



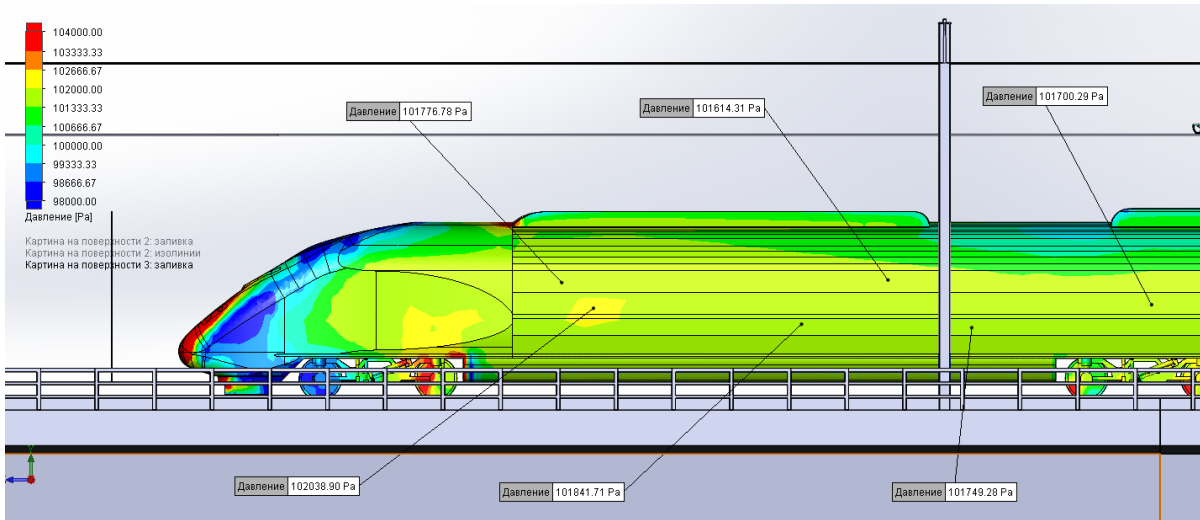
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Вид сверху



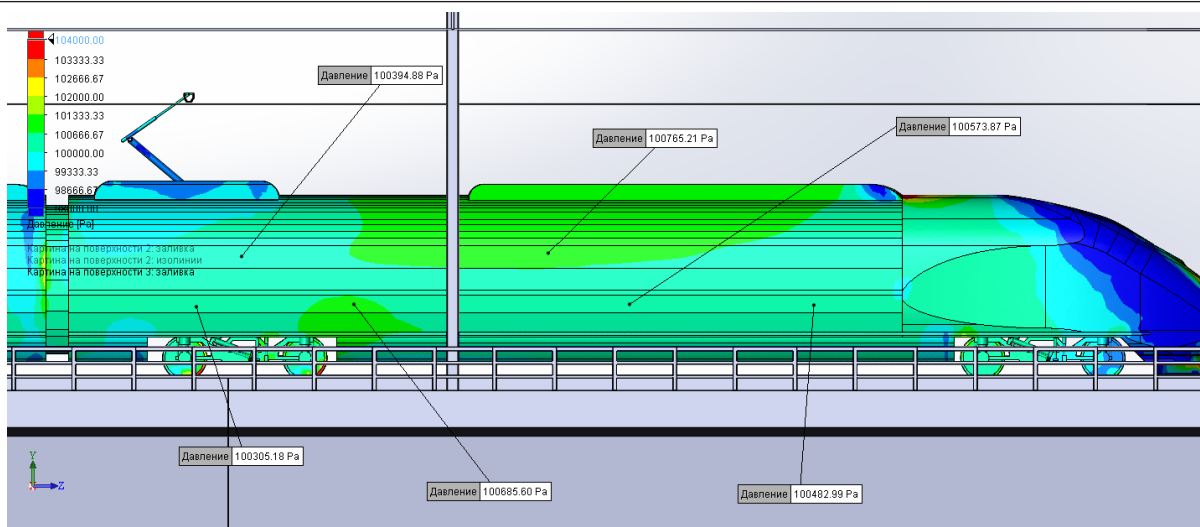
Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Сечение, вид спереди



Траектории смешанного потока воздушных масс, образованного боковой ветровой нагрузкой и нагрузкой, сформированной движением поезда. Изометрия



Распределение давления среды на поверхности вагона. Наветренная сторона, головной вагон



Распределение давления среды на поверхности вагона. Подветренная сторона, головной вагон

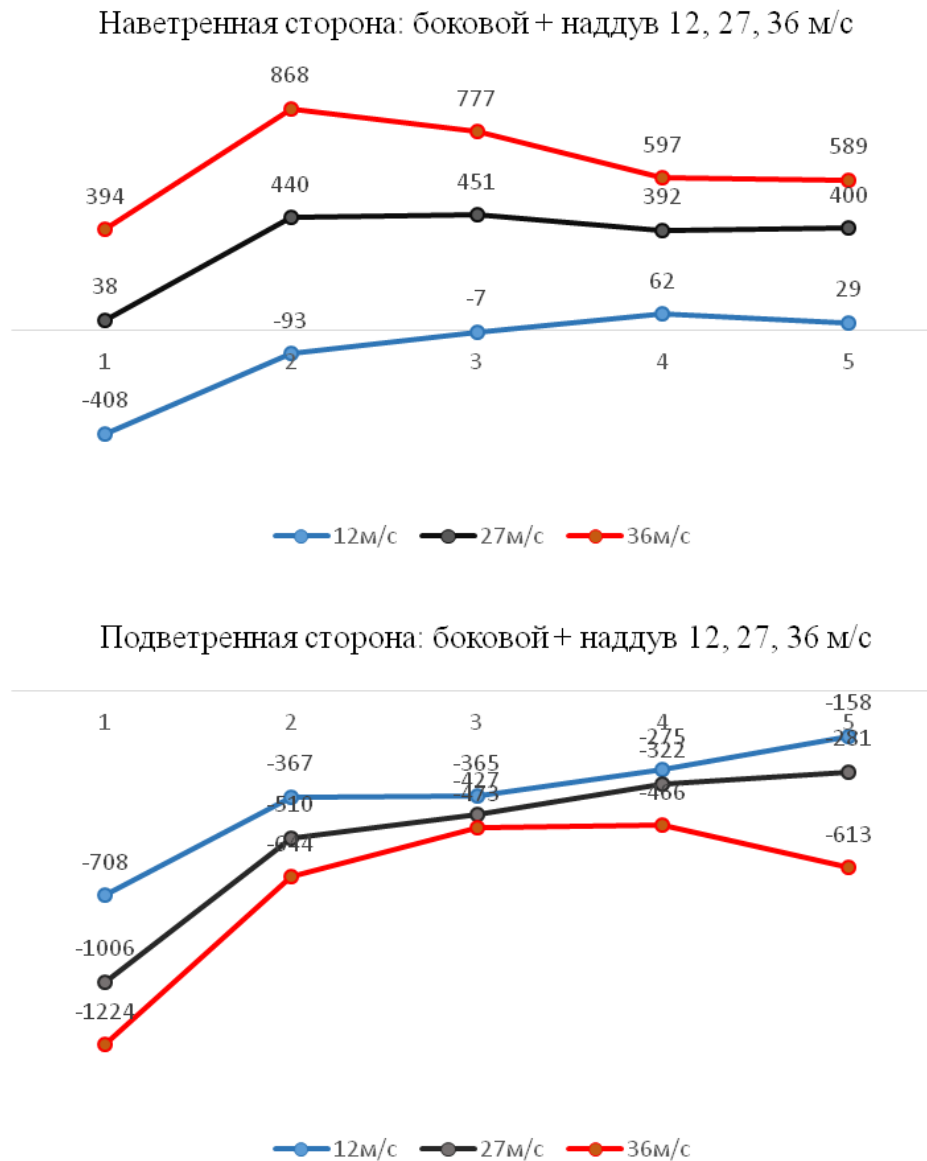


Рис. 3. Наветренная и подветренная сторона вагона, распределение давления по индикаторным линиям

Дополнительная нагрузка от момента крена бокового отбоя для горизонтального подвешивания с наветренной и подветренной стороны вагона наиболее критична для головного вагона состава. Моделирование совместного действия воздушных потоков инерционного наддува и бокового направлений отображает явление сноса потока осевого направления по направлению действия бокового (рис. 3).

Процесс сноса потока инерционного наддува направления практически завершается за пределами головного обтекателя. Таким образом, можно утверждать, что устойчивость состава может определяться с учетом ветровой нагрузки только бокового направления.

ТАБЛИЦА 2. Ветровая нагрузка на боковую поверхность вагона

Уровень индикаторной линии	Скорость ветра 12 м/с		Скорость ветра 27 м/с		Скорость ветра 36 м/с	
	Наветренная сторона, Па	Подветренная сторона, Па	Наветренная сторона, Па	Подветренная сторона, Па	Наветренная сторона, Па	Подветренная сторона, Па
1	-408	-708	38	-1006	394	-1224
2	-93	-367	440	-510	868	-644
3	-7	-365	451	-427	777	-473
4	62	-275	392	-322	597	-466
5	29	-158	400	-281	589	-613

В результате проведенного численного моделирования получены значения давлений на поверхности корпусных элементов состава в зонах избыточного давления и зонах разряжения. Кроме того, определены площади приложения этих нагрузок на поверхности вагона (табл. 2).

С целью определения степени разгрузки ходовых колес под воздействием ветровой нагрузки необходимо смоделировать систему подвешивания ходовых устройств. Система подвешивания двухуровневая:

- первичное рессорное подвешивание реализуется одноповодковыми буксами, гидравлическими гасителями вертикальных колебаний и цилиндрическими винтовыми пружинами;

- вторичное рессорное подвешивание реализуется при помощи пневмобаллонов, гидравлических гасителей вертикальных, поперечных колебаний и виляния.

Первичное подвешивание (колесо — тележка) пружинное — 1400 кН/м, вторичное подвешивание (тележка — кузов) — пневмоподвеска — 670 кН/м. Кроме того, конструкция ходовых устройств поезда оборудована устройством поперечной устойчивости (от раскачивания): первичное — 1100 кН/м; вторичное — 410 кН/м.

Таким образом, конструкцию подвешивания ходового устройства поезда можно представить как двухуровневую систему верхних и нижних вертикально установленных пружин, соответственно определяющих жесткость первичного и вторичного подвешивания, дополнительно объединенных диагонально расположенными, накрест соединенными пружинами, определяющими поперечную жесткость подвески (рис. 4). Нагрузки на колесо R_A , R_B находятся в соответствии со схемой определения боковой устойчивости подвижного состава (рис. 4) по следующей зависимости:

$$R_A = \frac{n \cdot g \cdot F}{2S \cdot 4} = \frac{2,5 \cdot 0,5 \cdot 25 \cdot 3}{1,58 \cdot 4} = 15 \text{ кН.}$$

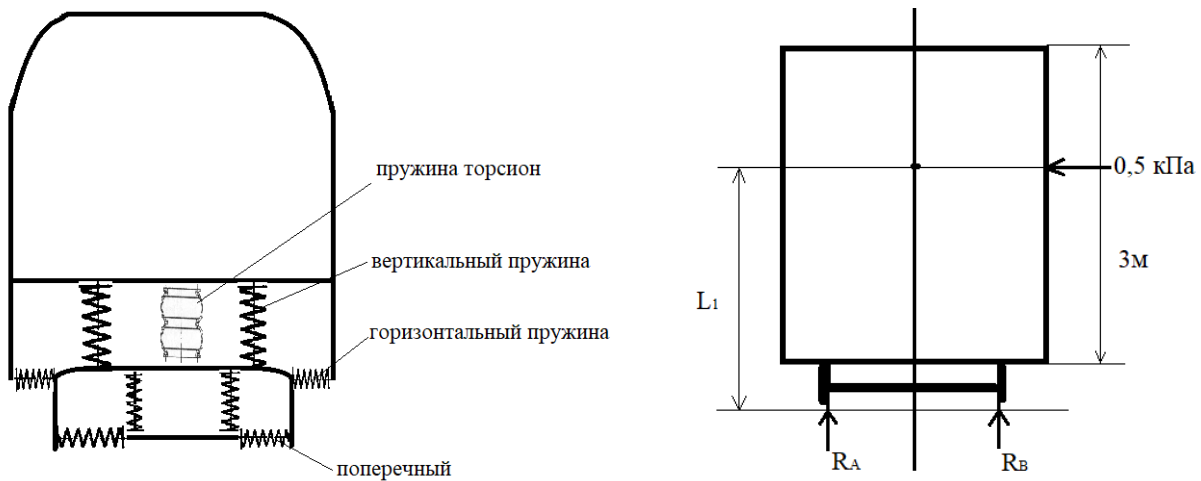


Рис. 4. Конструктивная схема рессорного подвешивания подвижного состава:
 R_A, R_B — нагрузка на колесо; F — площадь проекции боковой поверхности вагона (~75 м²); $[g] = 500 \text{ Н/м}^2$

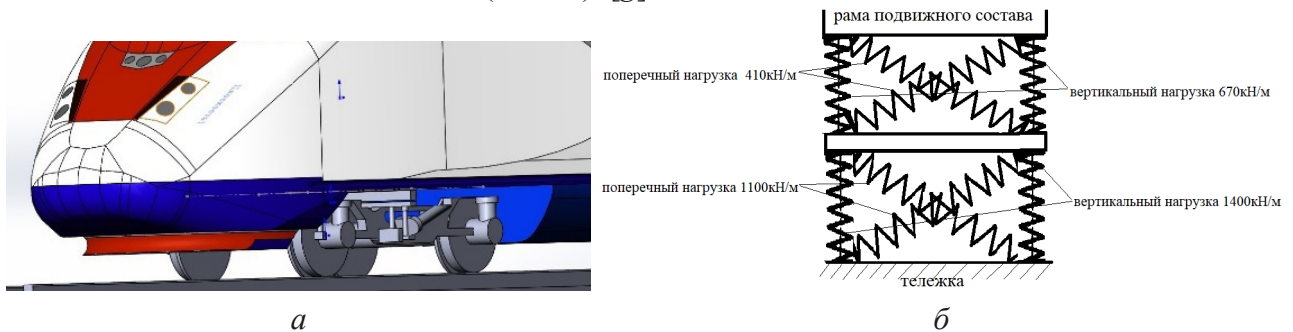


Рис. 5. Практическая реализация и модель подвешивания системы подвешивания ходовой части:
 а — конструкция; б — условное представление

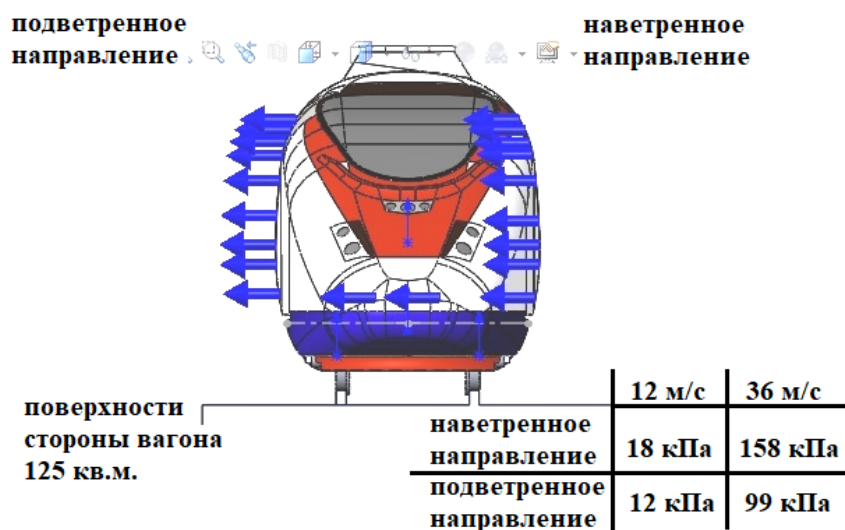


Рис. 6. Расчетная схема нагружения конструкции состава давлением, полученным в результате исследования процесса обтекания воздушными массами состава

Практическая реализация модели (рис. 5) представляет собой упрощенную конструкцию ходовой тележки с сохранением основной функциональной составляющей — наддресорной балки, к которой осуществляется крепление виртуальных пружин.

На рис. 6 представлена расчетная схема нагружения конструкции состава давлением (нагрузки (давления), прикладываются к соответствующим поверхностям вагона (при этом давления заменяются на соответствующую распределенную силу, отрицательное давление представляется как противоположно направленная сила)), полученным в результате исследования процесса обтекания воздушными массами состава.

Моделирование механического действия воздушных потоков бокового направления

Процесс моделирования осуществляется в специализированном модуле среды инженерного анализа среды SolidWorks Motion [13]. Симуляция осуществляет динамическое приложение нагрузки во времени, при этом выполняется расчет реакции объекта на данный вид нагружения с частотой итераций (кадров), заданных в соответствии с уровнем требуемой точности.

Система считается динамически устойчивой при условии самостоятельного восстановления собственной устойчивости после снятия возмущающего внешнего фактора. Тестирование осуществляется внезапным снятием действия возмущающего фактора (ветровой нагрузки) на подвижной состав, после прекращения ее действия — система должна самостоятельно прийти в состояние устойчивого равновесия (рис. 7, 8).

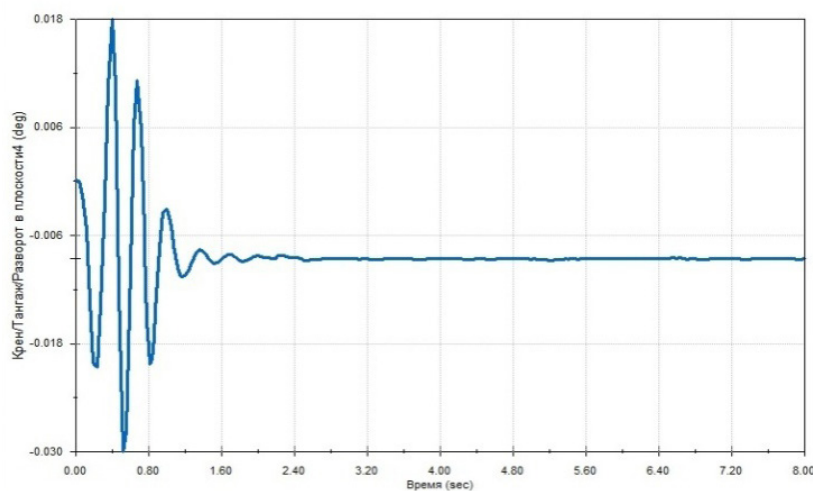


Рис. 7. Динамика изменения давления на колесо и крена корпуса вагона при воздействии воздушного потока со скоростью 12 м/с

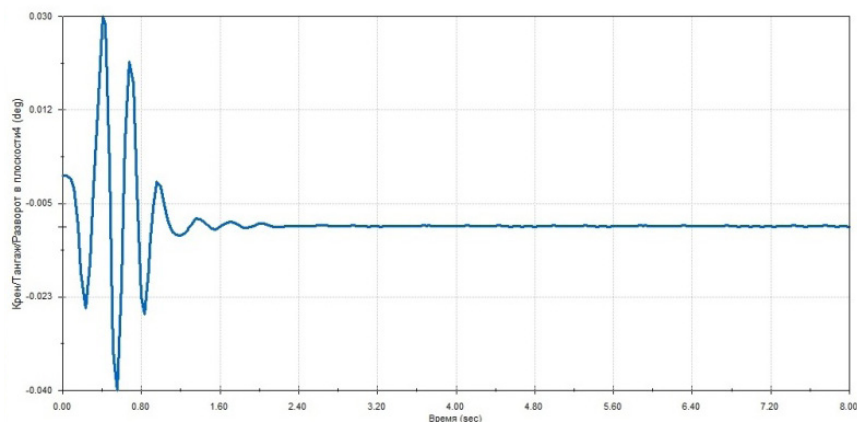


Рис. 8. Динамика изменения крена корпуса вагона при воздействии воздушного потока со скоростью 36 м/с

В результате проведенного исследования (рис. 9–12) установлено, что конструкция при скорости ветра 12 м/с имеет максимальный размах углового отклонения 0,048 град. и возвращается в устойчивое состояние в течение 2,4 с; при скорости ветра 36 м/с имеет максимальный размах углового отклонения 0,07 град. и возвращается в устойчивое состояние в течение 2,4 с (с момента снятия возмущающего фактора).

Из табл. 3 следует, что минимальный уровень нагрузки на ходовое колесо не превышает предельного допустимого значения 10 % от весовой номинальной нагрузки.

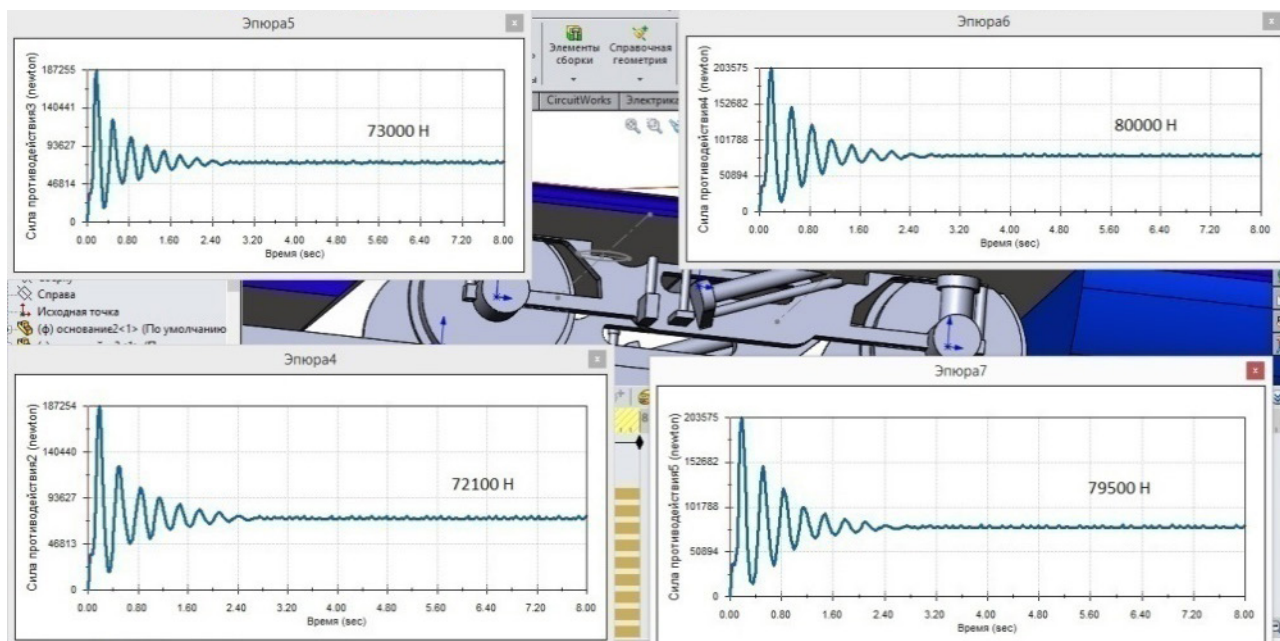


Рис. 9. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней тележки при скорости воздушного потока 12 м/с

ТАБЛИЦА 3. Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 12 м/с

Рельс	Нагрузка на колеса передней тележки, кН (%)		Нагрузка на колеса задней тележки, кН (%)	
	Правый	Левый	Правый	Левый
Правый	7,3 (11,67)	8 (12,78)	7,73 (12,35)	8,48 (13,55)
Левый	7,21 (11,52)	7,95 (12,7)	7,68 (12,27)	8,36 (13,36)

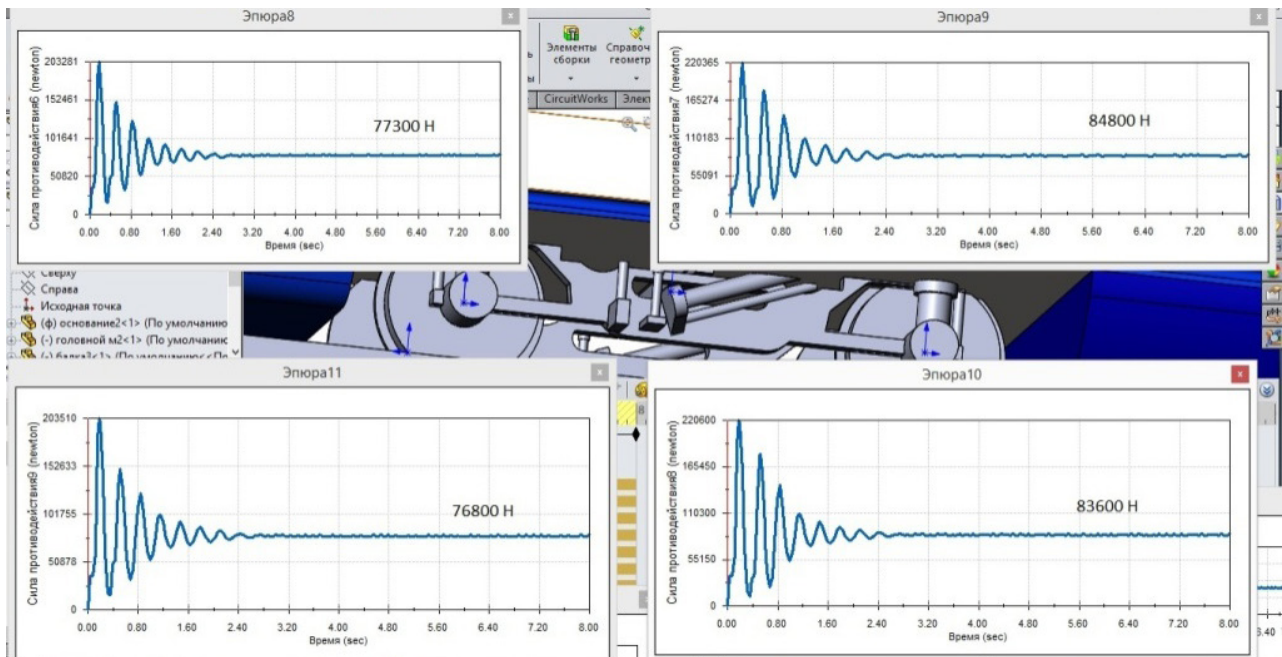


Рис. 10. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» задней тележки при скорости воздушного потока 12 м/с

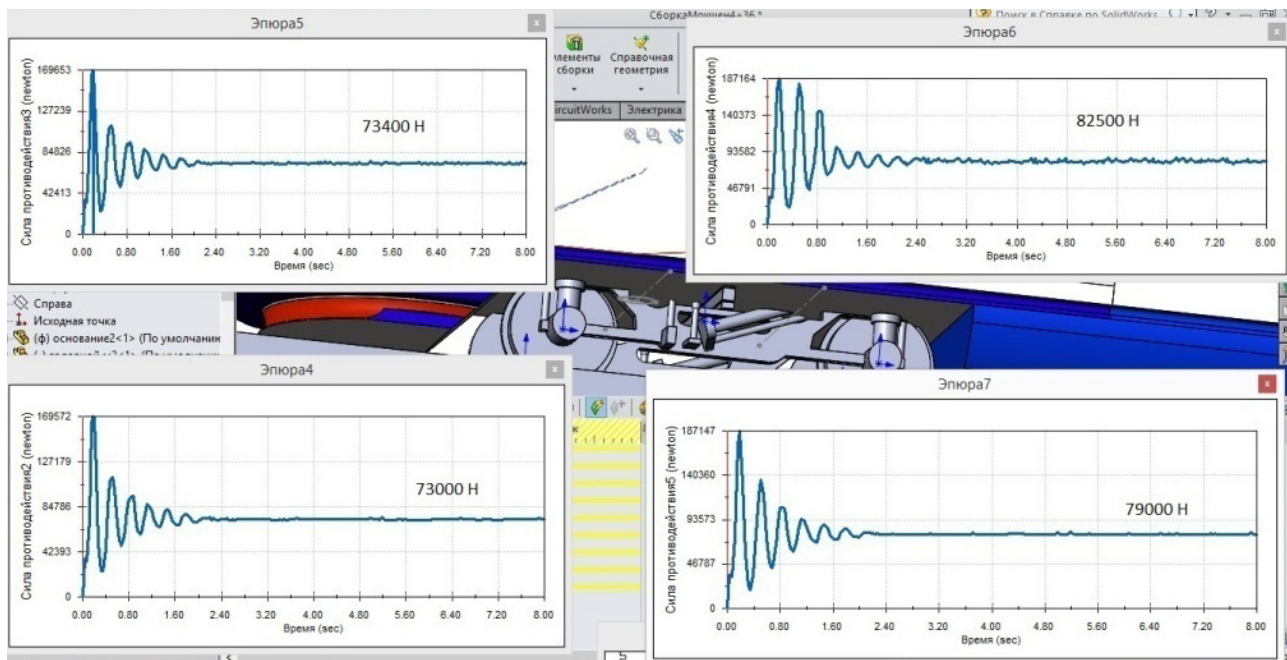


Рис. 11. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней тележки при скорости воздушного потока 36 м/с

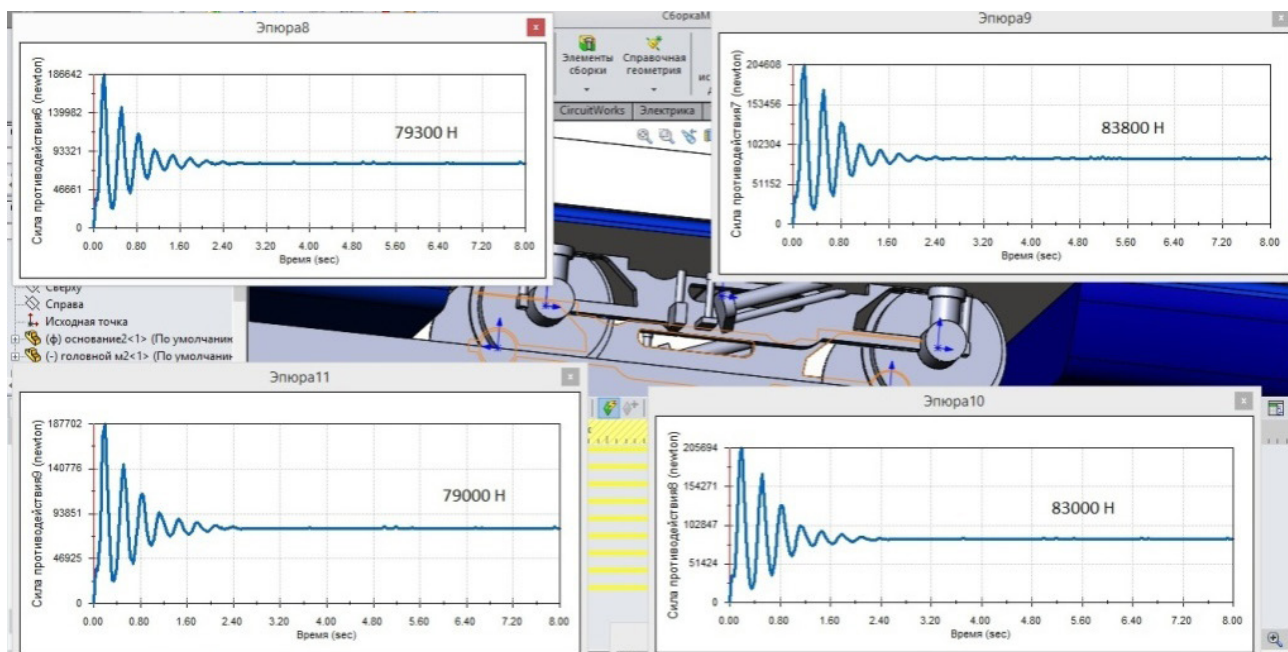


Рис. 12. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» задней тележки при скорости воздушного потока 36 м/с

ТАБЛИЦА 4. Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 36 м/с

Рельс	Нагрузка на колеса передней тележки, кН (%)		Нагрузка на колеса задней тележки, кН (%)	
	Правый	Левый	Правый	Левый
Правый	7,34 (11,61)	8,25 (13)	7,93 (12,52)	8,38 (13,23)
Левый	7,3 (11,53)	7,9 (12,48)	7,9 (12,48)	8,3 (13,11)

Из табл. 4 следует, что минимальный уровень нагрузки на ходовое колесо не превышает предельного допустимого значения 10 % от весовой номинальной нагрузки.

Моделирование механического совместного действия воздушных потоков инерционного наддува и бокового направлений

На рис. 13, 14 представлена динамика изменения крена корпуса вагона при воздействии воздушного потока при скоростях 12 и 36 м/с соответственно.

В результате проведенного исследования установлено, что конструкция при скорости ветра 12 м/с имеет максимальный размах углового отклонения 0,076 град., и возвращается в устойчивое состояние в течение 1,8 с; при скорости ветра 36 м/с имеет максимальный размах углового отклонения 0,235 град. и возвращается в устойчивое состояние в течение 2 с — с момента снятия возмущающего фактора (рис. 13, 14).

Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней и задней тележек при скоростях 12 и 36 м/с соответственно представлены на рис. 15–18.

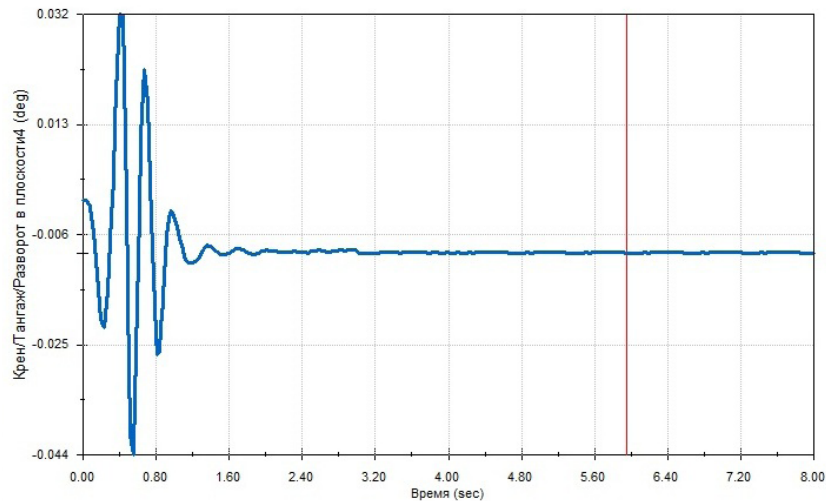


Рис. 13. Динамика изменения крена корпуса вагона при воздействии воздушного потока со скоростью 12 м/с

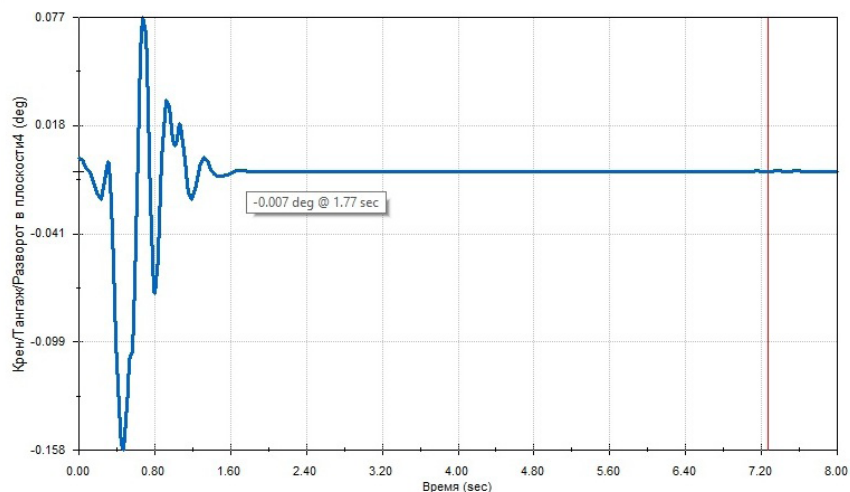


Рис. 14. Динамика изменения крена корпуса вагона при воздействии воздушного потока со скоростью 36 м/с

ТАБЛИЦА 5. Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 12 м/с

Рельс	Нагрузка на колеса передней тележки, кН		Нагрузка на колеса задней тележки, кН	
	1	2	3	4
Правый	7,26 (11,6)	8,03 (12,8)	7,65 (12,24)	8,33 (13,32)
Левый	7,41 (11,8)	7,68 (12,28)	7,9 (12,64)	8,28 (13,24)

Из табл. 5 следует, что минимальный уровень нагрузки на ходовое колесо не превышает предельного допустимого значения 10 % от весовой номинальной нагрузки.

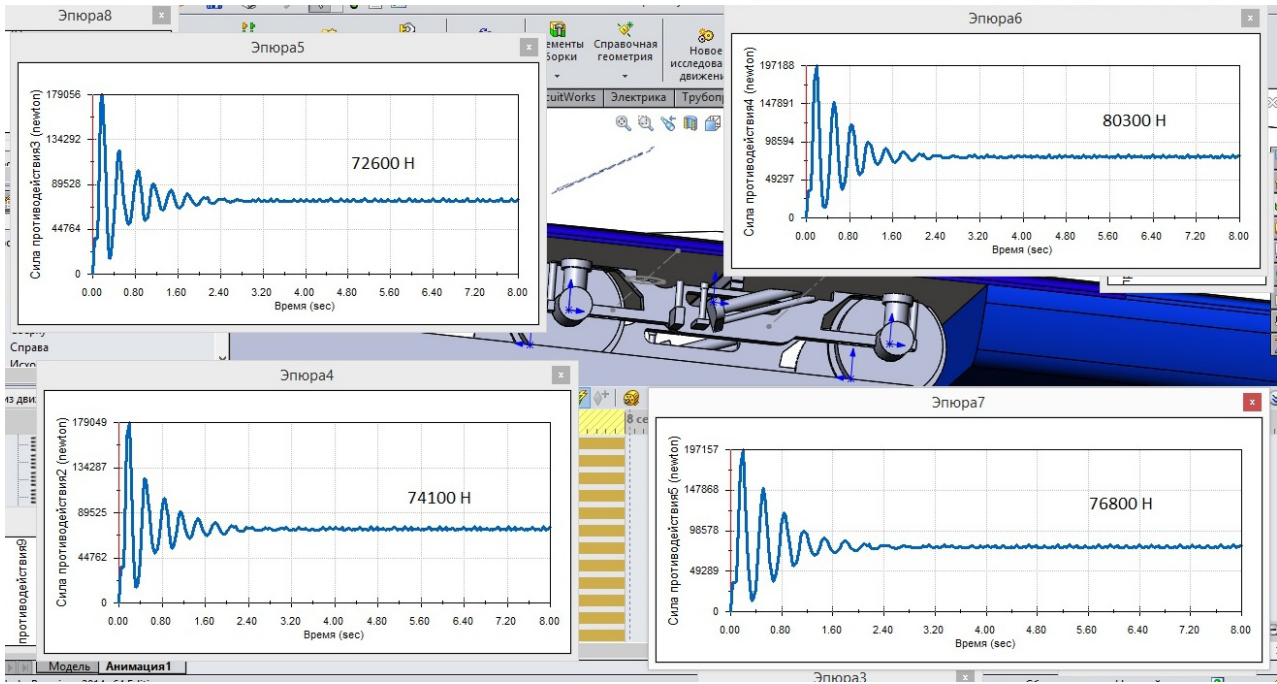


Рис. 15. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней тележки при скорости воздушного потока 12 м/с

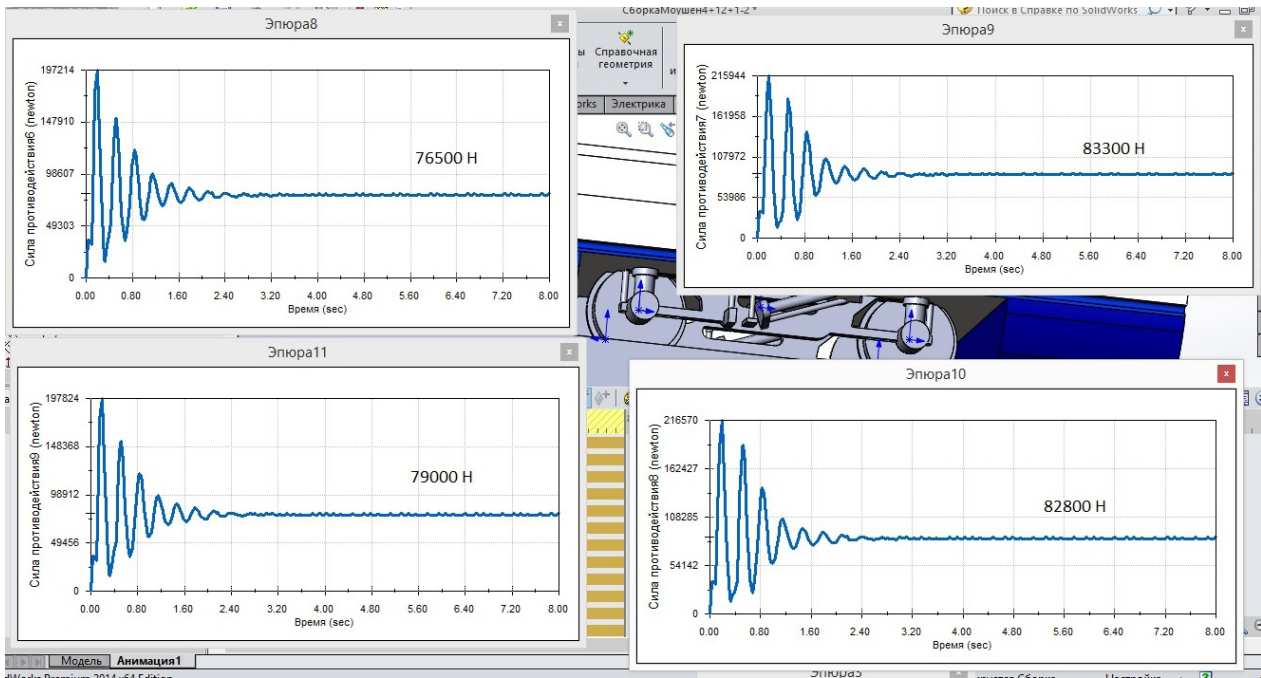


Рис. 16. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» задней тележки при скорости воздушного потока 12 м/с

Из табл. 6 следует, что минимальный уровень нагрузки на ходовое колесо превышает предельно допустимое значение 10 % от весовой номинальной нагрузки на передней тележке на левом колесе.

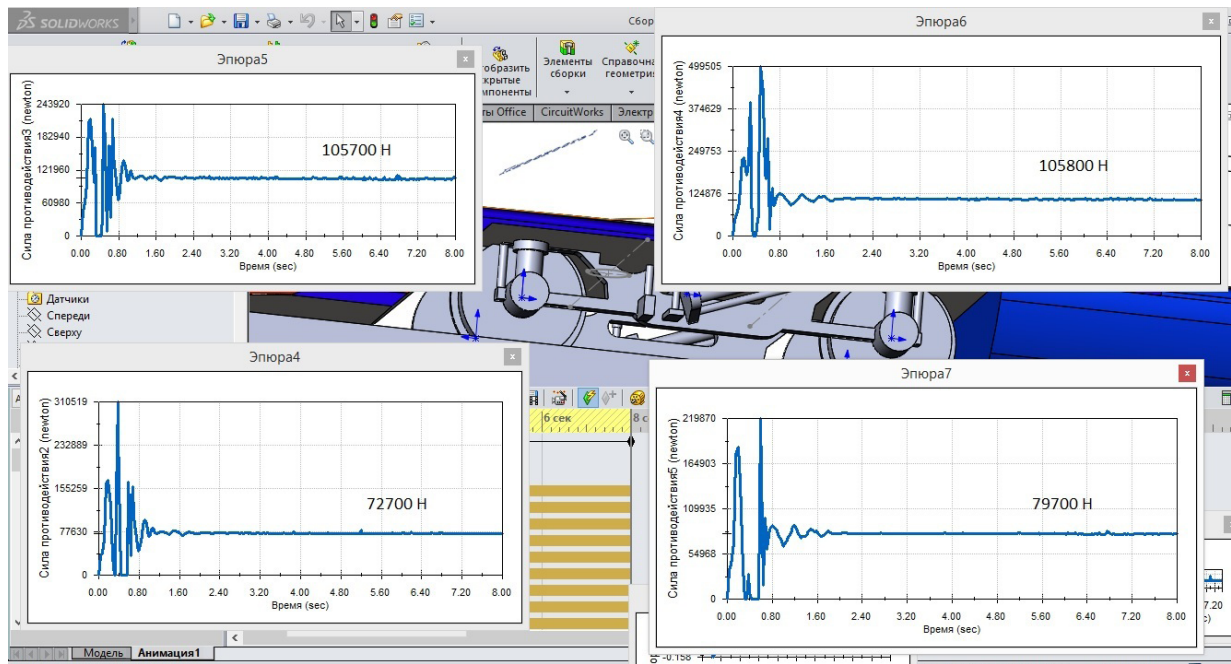


Рис. 17. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» передней тележки при скорости воздушного потока 36 м/с

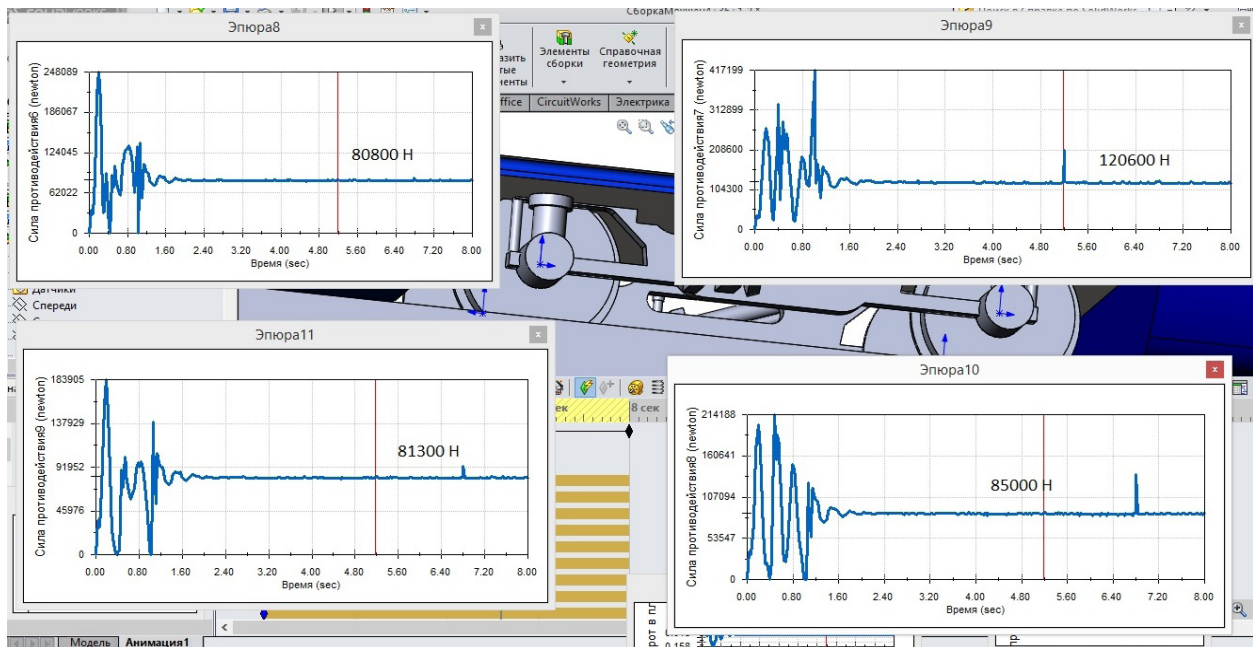


Рис. 18. Реакции в контактных группах «ходовые колеса — головка рельса» задней тележки при скорости воздушного потока 36 м/с

ТАБЛИЦА 6. Нагрузки на ходовые колеса при скорости воздушного потока 36 м/с

Рельс	Нагрузка на колеса передней тележки, кН		Нагрузка на колеса задней тележки, кН	
Правый	10,57 (14,4)	10,58 (14,4)	8,08 (11)	12,3 (16,75)
Левый	7,27 (9,9)	7,97 (10,85)	8,13 (11)	8,5 (11,5)

Таким образом, установлено, что в случае превышения скорости воздушных масс на 20 % выше максимально зафиксированных на местности северо-восточного плоскогорья правобережья г. Ангрена (36 м/с) в преобладающем направлении ветра возможно недопустимое снижение весовой нагрузки на передней тележке на левом колесе.

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Библиографический список

1. Джаббаров С. Т. Движение тонкого осесимметрического тела в полупространстве, занятом сжимаемым газом / С. Т. Джаббаров // Проблемы механики. — 2016. — Вып. 1. — С. 12–17.
2. Лазаренко Ю. М. Аэродинамическое воздействие высокоскоростного электропоезда «Сапсан» на пассажиров на платформах и на встречные поезда при скрещении / Ю. М. Лазаренко, А. Н. Капускин // Вестн. ВНИИЖТа. — 2012. — № 4. — С. 11–14.
3. Сюзюмова Е. М. Исследование воздушных потоков на пассажирской платформе при прохождении поезда / Е. М. Сюзюмова // Вестн. ВНИИЖТа. — 1973. — № 4. — С. 50–52.
4. Sterling M. A Study of the Slipstreams of High-Speed Passenger Trains and Freight Trains / M. Sterling, C. J. Baker, S. C. Jordon et al. // Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. — 2008. — Vol. 222. — Iss. 1. — Pp. 177–193. — DOI: 10.1243/0954409-7jrrt133.
5. Ламб Г. Гидродинамика / Г. Ламб. — М.: ОГИЗ, 1947. — 929 с.
6. Сагомоян А. Я. Проникание / А. Я. Сагомоян. — М.: МГУ, 1974. — 299 с.
7. Кравец В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов. Ч. 1 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Залізн. трансп. України. — 2005. — № 2.
8. Кравец В. В. Аэродинамика высокоскоростных поездов. Ч. 2 / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Залізн. трансп. України. — 2005. — № 3. — С. 16–20.
9. Кравец В. В. Аэродинамика частично перекрытого межвагонного пространства скоростного поезда / В. В. Кравец, Е. В. Кравец // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. імені акад. В. Лазаряна. — Дніпропетровськ, 2005.
10. Кравец Е. В. Влияние типа обтекателя на аэродинамическое сопротивление межвагонного пространства скоростного поезда / Е. В. Кравец // Сб. науч. тр. Серия: «Механика» / Днепропетр. нац. ун-т.
11. Baker C. J. Keynote lecture — The flow around high speed trains / C. J. Baker // Proc. of the BVAA VI conference. — Milano, Italy, 2008. — P. 34.
12. Baker C. The flow around high speed trains / C. Baker // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2010. — Vol. 98. — Iss. 6–7. — Pp. 277–298. — DOI: 10.1016/j.jweia.2009.11.002.
13. Khayrullina A. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform / A. Khayrullina, B. Blocken, W. Janssen et al. // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 2015. — Vol. 139. — Pp. 100–110. — DOI: 10.1016/j.jweia.2015.01.019.

Дата поступления: 28.04.2023

Решение о публикации: 28.05.2023

Контактная информация:

КАРИМОВ Дастонбек Давронбой угли — аспирант; dostonkarimov325@gmail.com

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; 79219751198@yandex.ru

ВАТАЕВ Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доц., avataev@yandex.ru

ВАТУЛИН Ян Семенович — канд. техн. наук, доц.; yan-roos@yandex.ru

СОТНИКОВ Кирилл Андреевич — аспирант; k-sotnikov@yandex.ru

Study of Transverse Stability of High-Speed Rolling Stock at Tunnel Exit

D. D. Karimov, A. A. Vorob'ev, A. S. Vatayev, Ya. S. Vatulin, K. A. Sotnikov

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Karimov D. D., Vorob'ev A. A., Vatayev A. S., Vatulin Ya. S., Sotnikov K. A. Study of Transverse Stability of High-Speed Rolling Stock at Tunnel Exit. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 2, pp. 115–135. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-2-115-135

Summary

Purpose: Numerical simulation of aerodynamic interaction of a moving high-speed train with a wind load applied to the side surface of the train body elements during its exit from the tunnel to the open space is considered. The stability of the rolling stock was assessed according to the criterion of the minimum pressure of the weight load on the wheel. **Methods:** CFD modeling allows you to significantly expand the amount of information about the interaction of rolling stock with incoming air flow in various environmental conditions. **Results:** During numerical modeling, the pressure values on the surface of the housing elements of the composition in the overpressure zones and the underpressure zones were obtained. Besides, areas of application of these loads on car surface are defined. **Practical significance:** It was established that in case of exceeding the speed of air masses by 20% higher than the maximum recorded on the terrain of the northeastern plateau of the right bank of Angren in the prevailing wind direction, an unacceptable decrease in the weight load on the front trolley on the left wheel is possible.

Keywords: Aerodynamic effect, artificial tunnel-type structure, frontal air drag, confuser, diffuser, finite element method, static pressure, numerical simulation.

References

1. Dzhabbarov S. T. Dvizhenie tonkogo osesimmetricheskogo tela v poluprostranstve, zanyatom szhimaемым газом [Movement of a thin axisymmetric body in a half-space occupied by a compressible gas]. *Problemy mekhaniki* [Problems of Mechanics]. 2016, Iss. 1, pp. 12–17. (In Russian)
2. Lazarenko Yu. M., Kapuskin A. N. Aerodinamicheskoe vozdeystvie vysokoskorostnogo elektropoezda “Sapsan” na passazhirov na platformakh i na vstrechnye poezda pri skreshchenii [Aerodynamic impact of the Sapsan high-speed electric train on passengers on platforms and on

oncoming trains during crossing]. *Vestn. VNIIZhTa* [Vestn. VNIIZhT]. 2012, Iss. 4, pp. 11–14. (In Russian)

3. Syuzumova E. M. Issledovanie vozdushnykh potokov na passazhirskey platforme pri prokhozhenii poezda [Study of air flows on the passenger platform during the passage of the train]. *Vestn. VNIIZhTa* [Vestn. VNIIZhT]. 1973, Iss. 4, pp. 50–52. (In Russian)

4. Sterling M., Baker C. J., Jordon S. C. et al. A Study of the Slipstreams of High-Speed Passenger Trains and Freight Trains. Proc. of the Institution of Mechanical Engineering, Part F: J. of Rail and Rapid Transit. 2008, vol. 222, Iss. 1, pp. 177–193. DOI: 10.1243/0954409-7jrrt133.

5. Lamb G. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow: OGIZ Publ., 1947, 929 p. (In Russian)

6. Sagomonyan A. Ya. *Pronikanie* [Penetration]. Moscow: MGU Publ., 1974, 299 p. (In Russian)

7. Kravets V. V., Kravets E. V. Aerodinamika vysokoskorostnykh poezdov. Ch. 1 [Aerodynamics of high-speed trains. Part 1]. *Zalozn. transp. Ukraini* [Zalozn. transp. Ukraine]. 2005, Iss. 2, pp. 52–57.

8. Kravets V. V., Kravets E. V. Aerodinamika vysokoskorostnykh poezdov. Ch. 2 [Aerodynamics of high-speed trains. Part 2]. *Zalozn. transp. Ukraini* [Zalozn. transp. Ukraine]. 2005, Iss. 3, pp. 16–20.

9. Kravets V. V., Kravets E. V. Aerodinamika chastichno perekrytogo mezhvagonnogo prostranstva skorostnogo poezda [Aerodynamics of a partially covered inter-car space of a high-speed train]. *Visn. Dnipropetr. nats. un-tu zalozn. transp. imeni akad. V. Lazaryana* [Visn. Dnipropetr. nat. un-tu zalozn. transp. named after acad. V. Lazaryan]. Dnipropetrovs'k, 2005, Vip. 8, pp. 61–69.

10. Kravets E. V. *Vliyanie tipa obtekatelya na aerodinamicheskoe soprotivlenie mezhvagonnogo prostranstva skorostnogo poezda. Sb. nauch. tr. Seriya: "Mekhanika"* [Influence of the type of fairing on the aerodynamic resistance of the inter-car space of a high-speed train. Sat. scientific tr. Series: "Mechanics"]. Dnepropetrovsk: Dnepropetr. nats. un-t Publ., 2006, vol. 1, Iss. 10, № 2/1, pp. 113–119. (In Russian)

11. Baker C. J. Keynote lecture — The flow around high speed trains. Proc. of the BBA VI conference. Milano, Italy, 2008, p 34.

12. Baker C. The flow around high speed trains. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2010, vol. 98, Iss. 6–7, pp. 277–298. DOI: 10.1016/j.jweia.2009.11.002.

13. Khayrullina A., Blocken B., Janssen W. et al. CFD simulation of train aerodynamics: train-induced wind conditions at an underground railroad passenger platform. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015, vol. 139, pp. 100–110. DOI: 10.1016/j.jweia.2015.01.019.

Received: April 28, 2023

Accepted: May 28, 2023

Author's information:

Dostonbek D. KARIMOV — Postgraduate Student; dostonkarimov325@gmail.com

Aleksandr A. VOROB'EV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; 79219751198@yandex.ru

Andrey S. VATAEV — Associate Professor; avataev@yandex.ru

Yan. S. VATULIN — Associate Professor; yan-roos@yandex.ru

Kirill A. SOTNIKOV — Postgraduate Student; k-sotnikov@yandex.ru