

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.4

doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-64-75

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВАГОНОВ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА ПРИ БОКОВОМ ВЕТРЕ

Олег Евгеньевич Пудовиков^{1✉}, Шохрух Наримон угли Кахрамонов²

^{1,2} Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ olegep@mail.ru

² qahramonovsh1995@gmail.com

Аннотация

Цель исследования. Оценка устойчивости вагонов грузового поезда на горно-перевальных участках при воздействии бокового ветра с использованием современных методов компьютерного моделирования.

Задача. Определение величин аэродинамических сил и коэффициентов сопротивления, действующих на вагоны в составе поезда при различных направлениях ветра, изменяющемся в диапазоне от 0 до 180 градусов, и оценка влияния этих сил на запас устойчивости против опрокидывания, особенно в сложных условиях горной местности.

Методы исследования. В программном пакете Solidworks Flow Simulation выполнен аэродинамический расчёт методом компьютерного имитационного моделирования. Разработаны детализированные компьютерные 3D-модели вагонов (цистерны, полувагона, крытого вагона) с учётом их конструктивных элементов и геометрических размеров. Использование полученных аэродинамических результатов в специализированном программном обеспечении для расчёта коэффициентов запаса устойчивости каждого экипажа в составе.

Новизна работы. Установлены количественные закономерности распределения аэродинамических сил по длине состава в зависимости от угла воздействия ветрового потока. Определена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от положения вагона в составе (в зависимости от типа вагона и направления ветра более, чем 2 раза). Исследован эффект ускорения воздушного потока в приземном слое в горной местности и его влияние на устойчивость поезда.

Результаты исследования. В ходе исследования определена наибольшая поперечная сила воздушного потока, действующая на поезд при нормальном направлении ветра (90°). В горных условиях скорость ветра у поверхности может увеличиваться в 3 раза, создавая критические нагрузки.

Выводы. Снижение скорости движения поезда позволяет увеличить запас устойчивости до нормативных значений, и полученные данные могут быть использованы для оптимизации режимов движения поездов в сложных метеоусловиях.

Ключевые слова безопасность, движение, устойчивость, вагон, ветровая нагрузка, коэффициент.

Ссылка для цитирования:

Пудовников О.Е. К вопросу об оценке устойчивости вагонов грузового поезда при боковом ветре / О.Е. Пудовников, Ш.Е. Кахрамонов // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 12. – С.64-75. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-64-75.

Original article

Open Access Article

ON THE PROBLEM OF ASSESSING THE STABILITY OF FREIGHT TRAIN CARS IN CROSSWIND

Oleg Evgenyevich Pudovikov^{1✉}, Shokhrukh Narimon ugli Kakhramonov²

^{1,2} Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ olegep@mail.ru

² qahramonovsh1995@gmail.com

Abstract

Study objective. Assessment of the stability of freight train cars in mountainous and transshipment areas under the influence of crosswinds using modern computer modeling methods.

Task. Determination of the values of aerodynamic forces and drag coefficients acting on train cars in various wind directions ranging from 0 to 180 degrees, and assessment of the effect of these forces on the margin of stability against tipping, especially in difficult mountainous conditions.

Research methods. In Solidworks Flow Simulation software package, an aerodynamic calculation was performed using computer simulation method. Detailed 3D computer models of cars (tank cars, gondola cars, covered cars) have been developed, taking into account their structural elements and geometric dimensions. The obtained aerodynamic results are used in specialized software for calculating the safety margin coefficients of each carriage.

The novelty of the work. Quantitative patterns of distributing aerodynamic forces along the length of

the train, depending on the angle of the wind flow, are found out. The dependence of the coefficient of aerodynamic drag on the position of the car in the train (depending on the type of car and the wind direction by more than 2 times) is determined. The effect of accelerating the air flow in the surface layer in mountainous terrain and its effect on the stability of the train is studied.

Study results. During the study, the greatest transverse force of the air flow acting on the wind at normal wind direction (90°) is determined. In mountainous conditions, the wind speed at the surface can increase by 3 times, creating critical loads.

Conclusions. Reducing the speed of the train makes it possible to increase the stability margin to standard values, and the data obtained can be used to optimize train operating modes in difficult weather conditions.

Keywords: safety, movement, stability, car, wind load, coefficient of air drag.

Reference for citing:

Pudovnikov O.E., Shokhrukh K.N. On the problem of assessing the stability of freight train cars in crosswind. Transport Engineering. 2025;12: 64-75. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-64-75.

Введение

Обеспечение безопасности движения поездов является важнейшей задачей, решаемой как при проектировании подвижного состава и инфраструктуры железнодорожного транспорта, так и на этапе их эксплуатации.

К одним из наиболее серьезных нарушений безопасности движения поездов относятся сходы подвижного состава с рельсов, возникающие, как правило, вследствие ряда эксплуатационных факторов. Сходы вагонов с рельсов могут возникать из-за потери ими устойчивости из-за выдавливания или выдёргивания в результате воздействия значительных по величине продольных растягивающих или сжимающих продольных динамических и квазистатических сил, в особенности при наличии негативных сопутствующих факторов со стороны инфраструктуры, оказывающих воздействие на подвижной состав, например, нахождение поезда в кривых малого радиуса со значительным возвышением наружного рельса [1]. Помимо негативного влияния продольных сил, ведущих к потере устойчивости подвижного состава в рельсовой колее, угрозу представляют и боковые силы, центробежная

сила и сила тяжести, способные вызвать опрокидывание вагона наружу или внутрь кривого участка пути соответственно. Вероятность опрокидывания возрастает при увеличении продольных сил. Отметим, что во всех случаях, при оценке запасов устойчивости подвижного состава учитывают также фактор, не зависящий от состояния и конструкции подвижного состава и инфраструктуры и режимов ведения поезда, а именно ветровую нагрузку, оказывающую существенное воздействие на подвижной состав.

Высокая ветровая нагрузка, характеризующаяся значительной скоростью ветров и их повторяемостью, характерна для ряда регионов. К таким регионам относятся, в частности горные районы [2]. Так, на горно-перевальном участке Пап-2 – Ангрен железной дороги республики Узбекистан, зафиксированы ветры с максимальной скоростью, превышающей 45 м/с [3].

Силовое взаимодействие подвижного состава железных дорог и ветровых потоков носит аэродинамический характер, при этом величины сил, возникающих в результате этого взаимодействия, действующих на вагоны поезда, зависят от парамет-

ров воздушной среды, формы и площади поперечного сечения вагонов, направлением воздушного потока и ряда других параметров [4].

Вопросами исследования аэродинамики подвижного состава занимались многие отечественные и зарубежные учёные [5-11]. Предметом исследований являлись вопросы аэродинамического сопротивления поезда, оптимизации форм головных и хвостовых частей высокоскоростных поездов, выбор формы кузова локомотива, обеспечивающей минимальное аэродинамическое сопротивление подвижного состава, шума и вибраций, вызванных воздействием воздушного потока на подвижной состав, аэродинамическое воздействие поезда на инфраструктуру железнодорожного транспорта. Также в ряде работ при-

водятся результаты исследования влияния ветрового потока на подвижной состав, в частности, были рассмотрены вопросы влияния ветра на расход топливно-энергетических ресурсов на тягу грузовых поездов и на устойчивость подвижного состава [12]. Также были выполнены исследования, в которых анализируется безопасность железнодорожных контейнерных перевозок и определяются условия опрокидывания пустых контейнеров под воздействием ветровых нагрузок на прямых участках пути [13].

Отметим, что вопрос устойчивости подвижного состава при воздействии на него различных внешних факторов, в том числе и ветровой нагрузки, является одним из важнейших в задаче обеспечения безопасности движения поездов.

Имитационное моделирование аэродинамических характеристик подвижного состава

На сегодняшний день одним из основных и ключевых методов исследования аэродинамики поезда, включая анализ воздействия ветра на безопасность движения, является математическое моделирование с применением современных расчётных программных комплексов, таких как *ANSYS FLUENT*, *SOLIDWORKS Flow Simulation* и *Autodesk Simulation CFD* [14]. При моделировании подвижного состава в специальном программном комплексе нужно учитывать факторов, влияющих на аэродинамические сопротивление подвижного состава. К таким факторам относятся: параметры поезда, включая длину, типы и расположение вагонов в составе поезда; скорость движения поезда; климатические условия, а именно скорость и направление ветра, температура окружающей среды; план и профиль железнодорожного пути.

Было исследовано влияние ветровой нагрузки на грузовой поезд с использованием метода имитационного моделирования. Для проведения моделирования и выполнения расчетов был использован программный пакет *SOLIDWORKS*, а именно его расширение *Flow Simulation*, предназначенный для имитационного исследования течений жидкости или газа, а также процессов, возникающих при взаимодействии их с твёрдыми телами.

Для определения величины опрокидывающей силы, действующей на вагоны поезда в результате воздействия на них ветра, были выполнены расчёты с использованием моделей подвижного состава. В пакете *SOLIDWORKS* разработаны модели поездов, состоявшие из вагонов следующих типов: цистерна модели 15-2132, полувагон модели 12-132 и крытый вагон модели 11-2135-01 (рис. 1).

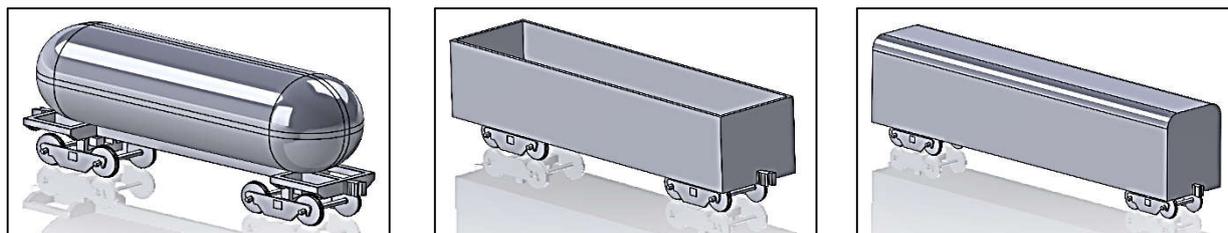


Рис. 1. Разработанные модели вагонов в программе *SOLIDWORKS*.
Fig. 1. Developed car models in the SOLIDWORKS program

При разработке моделей вагонов для каждого типа подвижного состава были учтены его основные конструктивные элементы и внешние геометрические размеры, что позволяет, не прибегая к методам теории подобия, получать достоверные результаты расчёта.

Все аэродинамические расчёты выполнены с помощью программного обеспечения *SOLIDWORKS Flow Simulation* для каждого типа модели поезда [15]. На первом этапе при выполнении расчётов были рассмотрены составы из трёх видов вагонов, установленных на верхнем строении пути, состоящим из рельсошпальной решётки, расположенной на горизонтальной поверхности.

После завершения этапа создания геометрических моделей, была создана расчётная область необходимого размера и заданы начальные условия в виде направления и скорости течения по осям X, Y, Z , а также физических параметров текучей среды.

При выполнении расчётов были приняты следующие параметры окружающей среды и воздуха: давление 101325 Па и температура 293,2 К, шероховатость поверхности вагонов была принята равной

100 мкм. Размеры расчётной области были приняты равными 10 м (высота), 335 м (длина) и 34 м (ширина) таким образом, чтобы вблизи границ расчётной области параметры течения были возможно ближе к параметрам течения невозмущённого потока. На начальном этапе расчёта поезда, состоящего из полувагонов область разбивалась на 1 295 863 ячеек, далее, в процессе, была использована автоматическая адаптация сетки для уменьшения размера элементов, расположенных в областях с наибольшей неоднородностью потока. Максимальное количество ячеек в процессе расчёта составило около 15 млн. ячеек.

Было проведено численное моделирование аэродинамических характеристик состава из порожних полувагонов при воздействии бокового ветра скоростью 15 м/с. Результаты расчетов представлены на рис. 2, где показаны:

- а) векторное поле скоростей воздушного потока в поперечном сечении относительно оси железнодорожного пути с визуализацией линий тока;
- б) распределение скоростей воздушных масс в том же сечении, отображенное с помощью изолиний.

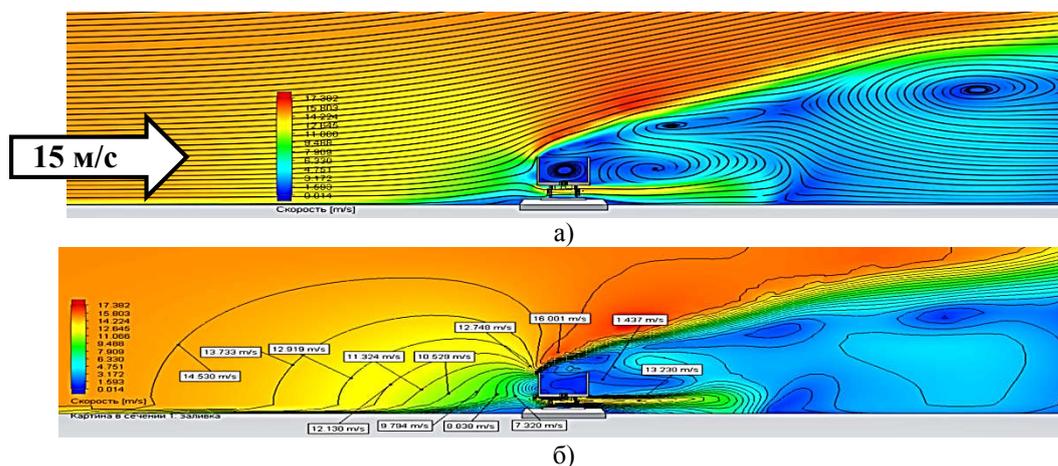


Рис. 2. Поле скоростей воздушного потока, линии тока в плоскости, перпендикулярной оси пути (а), изолинии скоростей воздушного потока (б)

Fig. 2. Air flow velocity field, streamlines in a plane perpendicular to the path axis (a), and air flow velocity isolines (b)

В результате были установлены особенности и закономерности изменения течения в областях пространства, расположенных вокруг поезда при различных направлениях ветра, получены поля скоростей воздушного потока, обтекающего ва-

гоны состава, в выбранном сечении, а также найдены силы, действующие на каждый экипажи поезда и установлены закономерности их изменения. Далее, с использованием найденных значений сил, действующих на вагоны поезда, были

определены величины коэффициентов аэродинамического сопротивления вагонов C_x в соответствии со следующей формулой [16]:

$$C_x = \frac{2F_B}{\rho V_B^2 S_{\Pi}}, \quad (1)$$

где F_B – величина силы, действующий на объект обтекающим его воздухом, Н; ρ – плотность воздуха, кг/м³; V_B – скорость

набегающего потока воздуха (ветра), м/с; S_{Π} – площадь боковой проекции объекта (вагона), м².

На рис. 3 приведены результаты расчёта величин коэффициента аэродинамического сопротивления, выполненные применительно к поезду, состоящему из порожних полувагонов.

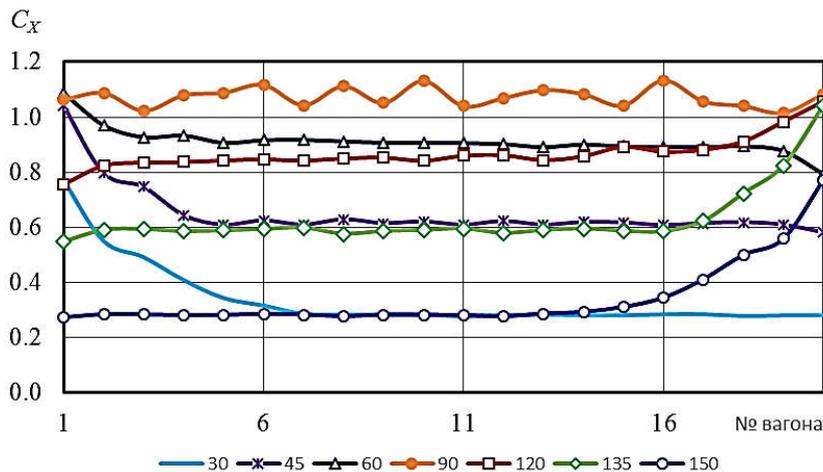


Рис. 3. Результаты расчёта величин коэффициента аэродинамического сопротивления порожних полувагонов в направлении, нормальном оси пути, при изменении угла набегающего воздушного потока
 Fig. 3. Results of calculating the aerodynamic drag coefficient of empty gondola cars in the direction normal to the track axis, when the angle of the air flow is changed

Как видно из представленных результатов, наибольшая в поперечном направлении сила действует на вагоны поезда в случае, если ветер направлен по нормали к оси пути, при этом сила, действующая на все вагоны поезда, является примерно одинаковой. Характер течения воздушного потока между вагонами, с наветренной, а также подветренной сторонами при этом также является примерно одинаковым (рис. 4а).

При изменении угла направления воздушного потока величины сил, действующих на вагоны поезда, изменяются в соответствии со следующей закономерностью: на вагоны, расположенные первыми с наветренной стороны, действует наибольшая по величине сила, которая убывает по мере удаления от этой части поезда, достигая установившегося значения у шестого - седьмого вагона (большой номер соответствует меньшей величине угла). Далее, по мере увеличения номера вагона, величина силы остаётся примерно одинаковой до последних 1...2 вагонов,

где она ещё несколько убывает, причём убывает тем больше, чем меньше отклонение угла набегающего воздушного потока на поезд от нормального. Подобная закономерность изменения величин действующих сил обусловлена различным характером обтекания воздушным потоком вагонов, расположенных в наветренной, подветренной, а также в средних частях поезда (рис. 4б).

Как видно, распределение скоростей в наветренной части поезда значительно отличается от распределения скоростей в средней части. Аналогично и в подветренной части, где сбегаящий поток отличается неоднородностью. Различия в характере обтекания вагонов вызывают различия в распределении давления на поверхности экипажей, а значит и сил, действующих на вагоны поезда. На рис. 4а, б приведены результаты расчётов по определению распределения давления на поверхности вагонов, расположенных с наветренной стороны головного (рис. 5а) и хвостового вагона поезда (рис. 5б).

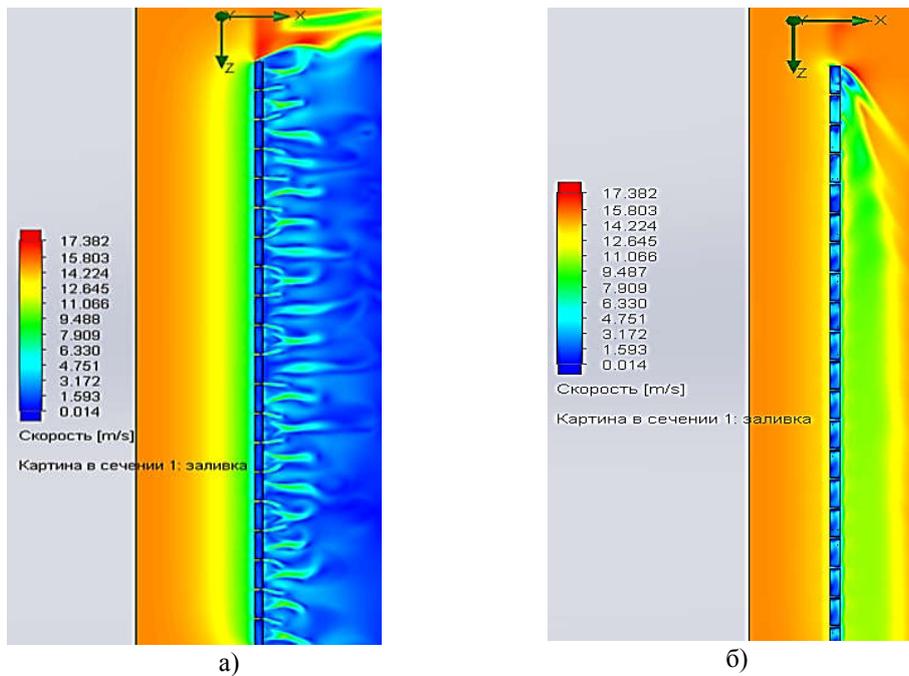


Рис. 4. Поле скоростей воздушного потока в плоскости, расположенной на уровне 1,5 м относительно уровня головки рельса, при направлении потока относительно оси пути 90 градусов (а) и 30 градусов (б)

Fig. 4. Air flow velocity field in a plane located at a height of 1.5 m above the rail head, with the flow direction relative to the track axis being 90 degrees (a) and 30 degrees (b)

Как видно, на торцевых частях вагонов, обращённых в сторону набегающего потока, присутствует область повышенного давления. При этом величина перепада давления на поверхности вагона, расположенного с наветренной стороны значительно больше, чем у вагона, расположенного с подветренной стороны и достигает и соответственно. Очевидно, это и объясняет значительную разницу в величинах

сил давления, действующих на вагоны поезда.

Аналогичные качественные результаты получены и для поезда, состоящего и крытых вагонов, а также вагонов цистерн. Результаты расчётов величин коэффициентов аэродинамического сопротивления для поездов, состоящих из крытых вагонов, а также вагонов-цистерн приведены на рис. 6, 7.

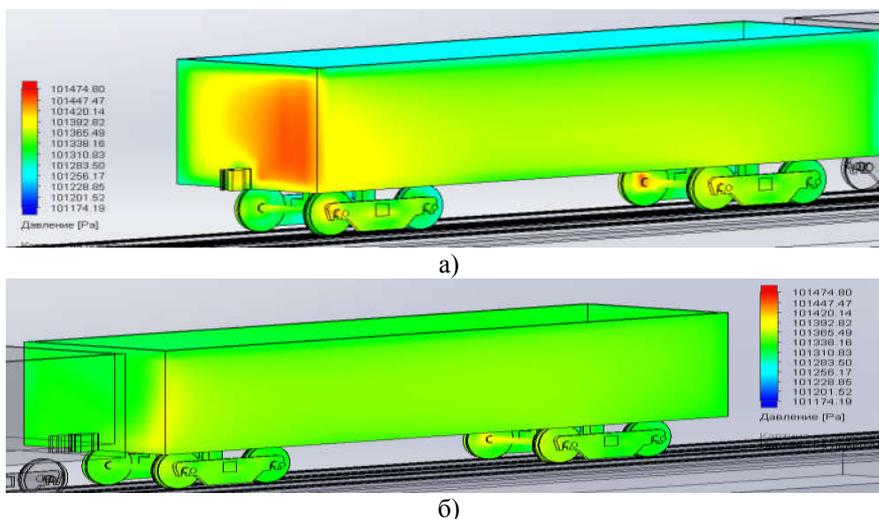


Рис. 5. Распределение давления на наветренных поверхностях первого (а) и последнего (б) вагонов при направлении воздушного потока относительно оси пути 30 градусов
Fig. 5. Distribution of pressure on the windward surfaces of the first (a) and last (b) cars when the air flow is directed 30 degrees relative to the track axis

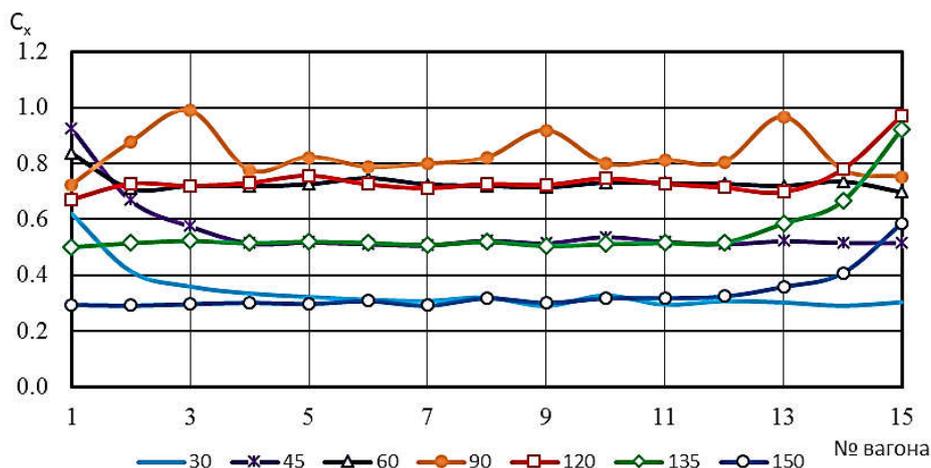


Рис. 6. Результаты расчёта величин коэффициента аэродинамического сопротивления крытого вагона в направлении, нормальном оси пути, при изменении угла набегания воздушного потока

Fig. 6. Results of calculating the aerodynamic drag coefficient of a covered wagon in a direction normal to the track axis, when the angle of the incoming airflow is changed

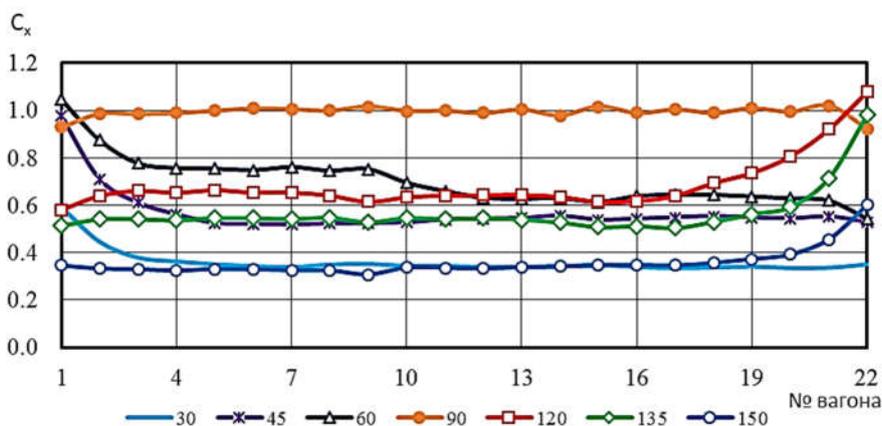


Рис. 7. Результаты расчёта величин коэффициента аэродинамического сопротивления вагон цистерн в направлении, нормальном оси пути, при изменении угла набегания воздушного потока

Fig. 7. Results of calculation of aerodynamic drag coefficient values of tank car in the direction normal to the track axis, when changing the angle of air flow

Оценка устойчивости грузового поезда против опрокидывания

Полученные значения коэффициентов аэродинамического сопротивления для каждого экипажа в диапазоне от 30 до 150 градусов с шагом 15 градусов позволяют вычислять силу, действующую на вагоны поезда от воздействия на них ветровой нагрузки при любых значениях скорости ветра в соответствии с (1). Полученные значения могут быть использованы при вычислении показателей безопасности движения поездов, в частности коэффици-

ента запаса устойчивости вагонов от опрокидывания в соответствии с ГОСТ 33211-2014 «Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам», при определении которых учитываются также значения продольных сил, действующих в поезде, а также параметры железнодорожного пути, определяемые его планом.

$$K_{yc} = \frac{P_{ст.}}{P_{дин}}. \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{ст.} = \frac{G_B - 2P_N^B}{2n_B} ; \\ P_{дин} = \frac{F_K h_K + 2F_T h_T + F_{BK} h_{BK} + 2F_{BT} h_{BT} + 2P_N^n h_a + G_K \Delta_K + 2G_T \Delta_T}{2Sn_B}, \end{cases} \quad (3)$$

где $P_{ст}$ – статическая вертикальная сила, действующая от колеса на рельс, с учетом силы тяжести вагона, Н; $P_{дин}$ – динамическая вертикальная сила, действующая от колеса на рельс и перемещений центров тяжести кузова вагона и тележки, Н; n_b – число осей вагона; F_K и F_T – боковые силы, действующие соответственно на кузов и тележку, возникающие вследствие центростремительного ускорения, Н; $F_{вк}$ и $F_{вт}$ – силы давления ветра, действующие соответственно на кузов и тележку, Н; P_N^B – вертикальная составляющая продольной силы, действующей на вагон через автосцепку, Н; P_N^n – боковая составляющая продольной силы, Н; G_b – сила тяжести вагона, Н; G_K и G_T – силы тяжести кузова и тележки соответственно, Н; h_K и h_T – вертикальное расстояние от уровня головок рельсов до центра масс кузова и тележки соответственно, м; $h_{вк}$ и $h_{вт}$ – вертикальное расстояние от уровня головок рельсов до гео-

метрического центра боковой проекции кузова и тележки соответственно, м; h_a – вертикальное расстояние от уровня головок рельсов до продольной оси автосцепки, м; $2S$ – расстояние между кругами катания колес в колесной паре, м; Δ_K и Δ_T – боковое перемещение центров тяжести кузова и тележки, м.

С использованием численных значений и закономерностей изменения коэффициента аэродинамического сопротивления, были выполнены расчёты по определению запаса устойчивости вагонов в поезде, движущемся по участку с кривыми малого радиуса, которые показали, что условия безопасного движения поезда по условию опрокидывания полувагонов нарушаются при скоростях ветра, превышающих 39 м/с (рис. 8), так как величина коэффициента запаса устойчивости становится меньше допустимой величины, равной 1,3.

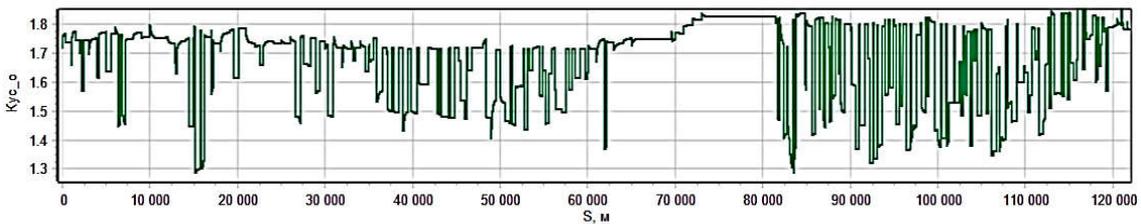


Рис. 8. График изменение коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания грузового поезда состоявшийся из полувагонов

Fig. 8. Graph of the change in the stability factor from overturning of a freight train consisting of semi-cars

Как отмечалось ранее, на величину коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания влияют величины продольных сил, действующих в поезде. На них можно воздействовать, выполнив корректировку режимов движения поезда, в частности, уменьшая скорость движения.

На рис. 9 приведены результаты расчёта величины коэффициента запаса

устойчивости при движении поезда с меньшей скоростью по тому же самому участку, что и в случае, результаты для которого приведены на рисунке 8. Как видно, снижение скорости позволило увеличить величину коэффициента запаса устойчивости до 1.36, что позволило обеспечить выполнение требований безопасности движения.

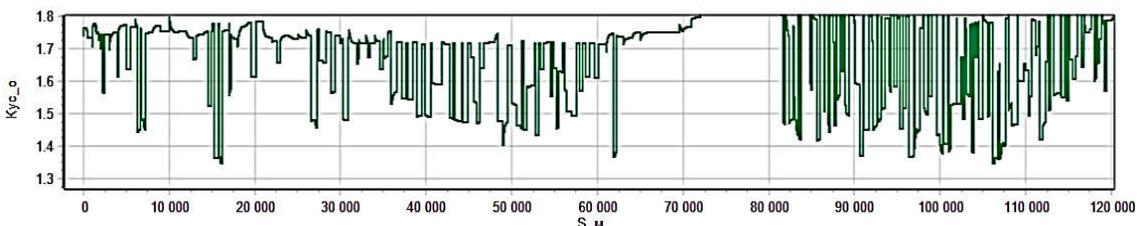


Рис. 9. График изменение коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания грузового поезда состоявшийся из полувагонов

Fig. 9. Graph of the change in the stability factor from overturning of a freight train consisting of semi-cars

Имитационное моделирование ветровой нагрузки в горных условиях

Найденные в результате выполнения расчётов результаты получены для случая нахождения поезда на равнинном участке. При нахождении поезда на участках, отличных от равнинных, на которых располагаются элементы земляного полотна (насыпи, выемки и их комбинации) значительных размеров, эти элементы оказывают существенное воздействие на траекторию воздушного потока, набегающего на поезд, а также на его скорость. Были выполнены расчёты для случая нахождения поездов, состоящих из вагонов тех же самых типов, что и в предыдущем случае, на однопутном участке с земляным полотном типа полунасыпь-полувыемка, характерным для железнодорожных трасс, проложенных в горных районах, с величиной уклона откоса насыпи и выемки, равной

1:1. Длина расчётной области принята той же самой, что и в предыдущем случае, а высота – равной 64 метрам и выбрана таким образом, чтобы вблизи границ расчётной области, расположенной с подветренной стороны, характер течения приблизился к безвихревому. Поверхность склона принята гладкой.

Расчёт был выполнен применительно к поезду, состоящему из порожних полувагонов, при скорости ветра, равной 15 м/с и направленном со стороны склона. На рисунке 10 приведены результаты расчёта, а именно поле скоростей воздушной среды скоростей в плоскости, перпендикулярной оси пути, с отображёнными линиями тока (рис. 10а), а также поле скоростей в той же плоскости с нанесёнными изолиниями скорости воздушного потока (рис. 10б).

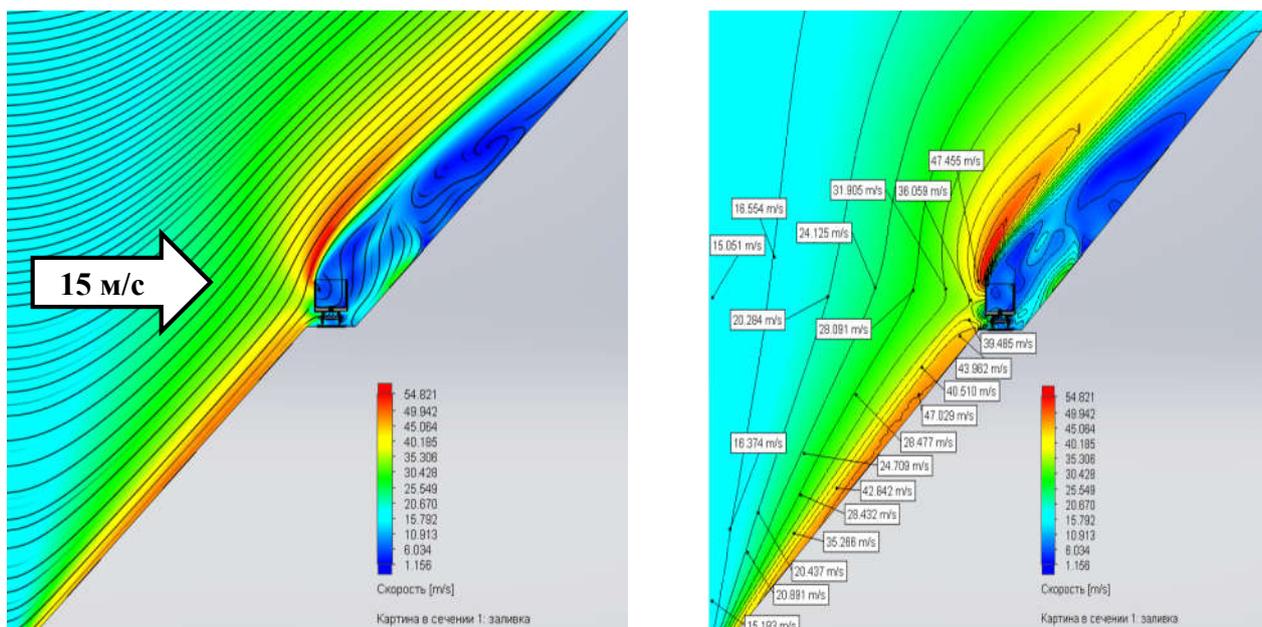


Рис. 10. Поле скоростей воздушного потока, линии тока в плоскости, перпендикулярной оси пути (а), изолинии скоростей воздушного потока (б)

Fig. 10. Air flow velocity field, streamlines in a plane perpendicular to the path axis (a), air flow velocity isolines (b)

Как видно из представленных результатов, ветровой поток, будучи направлен горизонтально, что подтверждается направлением линий тока вблизи входа в расчётную область, изменяет свою траекторию движения вверх, при этом вертикальное сжатие воздушного потока вызывает ускорение потока воздуха. Изменение скорости потока в различных областях тем больше, чем ближе эта область располо-

жена к склону. Так, при скорости ветра, равной 15 м/с, в рассмотренном варианте наибольшее расчётное значение скорости у поверхности более, чем в 3 раза превысило скорость ветра, превысив 45 м/с.

В районе боковой стенки вагона, из-за того, что вагон в своего рода «кармане», скорость потока снижается, оставаясь, тем не менее, значительно больше скорости ветра, и превышает 30 м/с. Увеличение

скорости воздушного потока приводит к квадратичному увеличению величины скоростного напора, а значит и силы, действующей на боковую поверхность вагона и, следовательно, опрокидывающего вагон момента. Очевидно, что на скорость воз-

Выводы

Результаты проведенного исследования влияния бокового ветра на устойчивости грузовых поездов имеют значительное практическое значение, особенно в контексте обеспечения безопасности движения на сложных горно-перевальных участках. Установлено, что силы, обусловленные давлением ветра, неравномерно распределяются по длине поезда, величины этих сил, воздействующие на вагоны, зависят от его позиции в поезде.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вершинский, С. В. Динамика вагона. Учебник для вузов ж.-д. трансп. / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов. Под ред. С. В. Вершинского. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1991. 360 с.
2. ГОСТ 16350-80. Климат СССР. Районирование и статические параметры климатических факторов для технических целей. М.: Издательство стандартов, 1981. 150 с.
3. Архив погоды в Камчике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tr5.ru/Архив_погоды_в_Камчике (дата обращения: 15.09.2024).
4. Чурков, Н. А. Аэродинамика железнодорожного поезда: (принципы конструирования подвижного состава, минимизирующие воздействия воздушной среды на железнодорожный поезд) / Н. А. Чурков ; Н. А. Чурков. Москва : Желдориздат, 2006. – ISBN 978-5-94069-013-9. – EDN QNUNQV.
5. Бороненко, Ю. П. Определение аэродинамического сопротивления грузовых поездов с инновационными полувагонами на цифровых моделях / Ю. П. Бороненко, Б. О. Поляков, Т. М. Белгородцева // Транспорт Российской Федерации. 2021. № 3(94). С. 57-61. – EDN VYSIIQ.
6. J. García. A second-generation URANS model (STRUCT-ε) applied to simplified freight trains / J. García, J. Muñoz-Paniagua, L. Xu, E. Baglietto // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2020 г. 205(4-6). <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104327>.
7. Y. Zhuang. Numerical investigation on the aerodynamics of a simplified high-speed train under crosswinds / Yueqing Zhuang, Xiyun Lu // Theoret-

и Applied Mechanics Letters. 2015 г. 5. 181-186. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2015.06.001>.

Боковой ветер, действующий на поезд, оказывает влияние на безопасность движения, создавая угрозу опрокидывания вагонов, которую можно парировать корректировкой режимов движения.

В условиях, когда грузовые поезда движутся по участкам в условиях горно-перевального профиля, из-за ускорения воздушного потока в приземных областях боковой ветер является серьезным фактором риска, способным привести к опрокидыванию вагонов.

8. Aerodynamic performance of a high-speed train passing through three standard tunnel junctions under crosswinds / Xiujuan Miao, Kan He, Guglielmo Minelli, Jie Zhang, Guangjun Gao, Hongliang Wei, Maosheng He and Sinisa Krajnovic // Applied sciences. 2020 г. 10(11). <https://doi.org/10.3390/app10113664>.
9. Effects of different aerodynamic configurations on crosswind stability of a conventional train / Carlos Esteban Araya Reyes, Daniele Rocchi, Gisella Tomasini, Mikel Iraeta S´anchez, Maialen Artano // Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 2023. 242. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105588>.
10. Dominic Flynn. On the effect of crosswinds on the slipstream of a freight train and associated effects / Dominic Flynn, Hassan Hemida, Chris Baker // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2016. 156. 14-28 p. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.07.001>.
11. On the correlation between aerodynamic drag and wake flow for a generic high-speed train / Xiao-Bai Li, Xi-Feng Liang, Zhe Wang, Xiao-Hui Xiong, Guang Chen, Yi-Zheng Yu, Chun-Mian Chen // Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 2021. 215. DOI:10.1016/j.jweia.2021.104698.
12. Гребнев, И. А. К оценке влияния ветровой нагрузки на грузовой поезд / И. А. Гребнев, О. Е. Пудовиков // Известия Транссиба. 2022. № 4(52). С. 13-22. – EDN CGNNYZ.
13. Условия опрокидывания порожних контейнеров под воздействием ветровых нагрузок / В. Г. По-

пов, А. В. Матешева, Ф. И. Сухов, Ю. К. Боландова // Мир транспорта. 2019. Т. 17, № 6(85). С. 50-61. – DOI 10.30932/1992-3252-2019-17-50-61. – EDN GVPEZO.

14. Гребнев, И. А. Оценка влияния воздушной среды на подвижной состав с использованием программного пакета SOLIDWORKS / И. А. Гребнев. – Текст : непосредственный // Неделя науки – 2022 : сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции (Москва, апрель –

май 2022 г.). Москва : РУТ (МИИТ), 2022. С. 252–253.

15. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты и SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. Москва : ДМК Пресс, 2010. 464 с. – ISBN 978-5-94074-586-0. – Текст : непосредственный.
16. Петров, К. П. Аэродинамика тел простейшей формы / К. П. Петров. Москва : Физматлит, 1998. 428 с. Текст : непосредственный.

REFERENCES

1. Vershinsky SV, Danilov VN, Khusidov VD. Dynamics of the carriage: textbook for universities of railway transport. 3rd ed. Moscow: Transport; 1991.
2. GOST 16350-80. Climate of the USSR. Regionalizing and statistical parameters of climatic factors for technical purposes. Moscow: Izdatelstvo Standartov; 1981.
3. Archive of the weather in Kamchatka [Internet]. 2024 Sept 15. Available from: https://rp5.ru/Weather archive_in the Camera.
4. Churkov NA. Aerodynamics of a railway train: (principles of rolling stock design that minimize the effects of the air environment on a railway train). Moscow: Zheldorizdat; 2006.
5. Boronenko YuP, Polyakov BO, Belgorodtseva TM. Determination of aerodynamic resistance of cargo trains with open-top wagons in digital simulations. Transport of the Russian Federation. 2021;3(94):57-61.
6. García J, Muñoz-Paniagua J, Baglietto LXuE. A second-generation URANS model (STRUCT-ε) applied to simplified freight trains. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics [Internet]. 2020;205(4-6). Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104327>.
7. Zhuang Y, Lu X. Numerical investigation on the aerodynamics of a simplified high-speed train under crosswinds. Theoretical and Applied Mechanics Letters [Internet]. 2015;5:181-186. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.taml.2015.06.001>.
8. Miao X, He K, Minelli G, Zhang J, Gao G, Wei H, He M, Krajnovic S. Aerodynamic performance of a high-speed train passing through three standard tunnel junctions under crosswinds. Applied Sciences [Internet]. 2020;10(11). Available from: <https://doi.org/10.3390/app10113664>.
9. Esteban Araya Reyes C, Rocchi D, Tomasini G, Iraeta Sánchez M, Artano M. Effects of different

aerodynamic configurations on crosswind stability of a conventional train. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics [Internet]. 2023;242. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105588>.

10. Flynn D, Hemida H, Baker C. On the effect of crosswinds on the slipstream of a freight train and associated effects. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics [Internet]. 2016;156:14-28. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.07.001>.
11. Li XB, Liang XF, Wang Z, Xiong XH, Chen G, Yu YZ, Chen CM. On the correlation between aerodynamic drag and wake flow for a generic high-speed train. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 2021;215. DOI:10.1016/j.jweia.2021.104698.
12. Grebnev IA, Pudovikov OE. To assess the effect of wind load on a freight train. Izvestiya Transsiba. 2022;4(52):13-22.
13. Popov VG, Matesheva AV, Sukhov FI, Bolandova YuK. Conditions for overturning of empty containers under the influence of wind loads. World of Transport and Transportation Journal. 2019;17(6(85)):50-61. DOI 10.30932/1992-3252-2019-17-50-61.
14. Grebnev IA. Assessment of the influence of the air environment on rolling stock using SOLIDWORKS software package. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, April – May, 2022: Science Week 2022; Moscow: RUT (МИИТ); 2022.
15. Alyamovsky AA. Engineering calculations and SolidWorksSimulation. Moscow: DMK Press; 2010.
16. Petrov KP. Aerodynamics of bodies of the simplest form. Moscow: Fizmatlit; 1998.

Информация об авторах:

Пудовиков Олег Евгеньевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропоезда и локомотивы», Российский университет транспорта, тел. 8 (495) 274-02-74 доб. 3746.

Pudovikov Oleg Evgenyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department

Кахрамонов Шохрух Наримон угли – аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы», Российский университет транспорта, тел. +7(916)774-75-87.

of Electric Trains and Locomotives, Russian University of Transport, phone: 8 (495) 274-02-74 ext. 3746.

Shokhrukh Kakhramonov Narimon ugli – Postgraduate Student of the Department of Electric Trains and

Locomotives, Russian University of Transport, phone: +7(916)774-75-87..

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 06.11.2025; одобрена после рецензирования 07.11.2025; принята к публикации 27.11.2025. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 06.11.2025; approved after review on 07.11.2025; accepted for publication on 27.11.2025. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.