
ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.4.05

Модель для исследования устойчивости вагонов грузового поезда при движении в условиях горно-перевального профиля и ветровых нагрузок

О. Е. Пудовиков, Ш. Н. Кахрамонов

Российский университет транспорта, Российская Федерация, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ГСП-4

Для цитирования: Пудовиков О. Е., Кахрамонов Ш. Н. Модель для исследования устойчивости вагонов грузового поезда при движении в условиях горно-перевального профиля и ветровых нагрузок // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 7–23. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-7-23

Аннотация

Цель: Представлена модель грузового поезда, предназначенная для анализа устойчивости подвижного состава при движении по горно-перевальным участкам железных дорог, особое внимание уделено влиянию на запасы устойчивости от опрокидывания ветровых нагрузок. Применительно к участку Ангрэн — Пап железных дорог Республики Узбекистан, на основании анализа режимных карт, а также информации о весовых нормах, установленных для данного участка, определены участки пути, при движении по которым наиболее выражена склонность вагонов к опрокидыванию, в том числе при действии ветровых нагрузок. В статье подчеркивается значимость эффективной и безопасной эксплуатации подвижного состава для обеспечения сохранности грузов и повышения безопасности в сложных горных условиях, включая крутые подъемы и спуски, а также кривые малого радиуса. **Методы:** Исследуется влияние продольных сил на устойчивость вагонов от опрокидывания, в том числе при воздействии ветра, направленного по нормали к оси пути. Авторами разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее выполнять имитационное моделирование движения поезда различной составности по пути переменного плана и профиля с учетом строительных параметров верхнего строения пути для анализа устойчивости вагонов от опрокидывания. Выполнен анализ полученных результатов, позволивший выявлять опасные участки, с целью последующей корректировки режимов ведения поезда для повышения безопасности движения. Для определения величин сил, действующих на вагоны поезда от воздействия ветра, был выполнен аэродинамический расчет с использованием модели поезда, разработанной в программе моделирования *SolidWorks*. **Результаты:** Определены величины коэффициента аэродинамического сопротивления для вагонов различных типов, найдены опасные участки, при движении по которым возникают предпосылки для потери устойчивости вагонов. **Практическая значимость:** Разработано специализированное программное обеспечение для анализа опасных факторов. Показана возможность оптимизации режимов управления грузовыми поездами для повышения безопасности движения поездов в условиях сложного горного рельефа при воздействии ветровых нагрузок.

Ключевые слова: Горно-перевальной участок, тяговые и тормозные характеристики, специализированное программное обеспечение, *SolidWorks*, *Flow Simulation*, ветровая нагрузка, продольные квазистатические силы, модель поезда, коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания, устойчивость вагонов.

Введение

На сегодняшний день во многих странах мира продолжает развиваться железнодорожный транспорт. Надежная и бесперебойная работа железнодорожного транспорта при перевозке грузов между странами является важным фактором, способствующим постоянному увеличению объема перевозок и сокращению времени доставки грузов.

С растущим объемом транзитных и местных грузовых перевозок увеличивается количество отправляемых грузовых поездов, что способствует более полному использованию наличной провозной и пропускной способности железнодорожной дороги, вплоть до их проектных значений. При исчерпании резервов пропускной способности железных дорог увеличение ее провозной способности может быть достигнуто применением современных, более мощных локомотивов. Данная задача в настоящее время является чрезвычайно актуальной и находится в стадии решения на железных дорогах Республики Узбекистан, в том числе при обеспечении международных мультимодальных транзитных коридоров.

Вместе с этим возрастает значимость факторов, способных составить угрозу безопасности движения поездов. К таким факторам относятся в том числе величины продольных динамических и квазистатических сил, действующих в поезде, способных вызвать разрыв автосцепок в случае превышения ими максимально допустимых по условиям прочности значений. Кроме этого, в этих случаях в поездах возникают условия, способствующие потере устойчивости вагонов и в последствии их сходу с рельсов. Особенно такая ситуация опасна на участках с кривыми малого радиуса и значительным возвышением наружного рельса. Дополнительным часто встречающимся опасным фактором на горно-перевальных участках железных дорог Республики Узбекистан является воздействие на вагоны бокового ветра значительной скорости, увеличивающее вероятность опрокидывания вагонов. В связи с этим исследование и изучение влияния режимов движения, плана и профиля пути, а также влияние ветровой нагрузки на устойчивость вагонов при вождении поездов в горной местности считается актуальной задачей.

Имитационная модель железнодорожного пути

После распада Советского Союза в 1991 году железнодорожное сообщение центральных и западных регионов Республики Узбекистан с восточными регионами, в которых расположена Ферганская долина, было прервано. Возобновление сообщения было возможно только через территорию Республики Таджикистан и потребовало заключения межправительственного соглашения для осуществления местных и транзитных перевозок. Однако постоянные задержки и изменение тарифных ставок снизили интенсивность железнодорожного сообщения до минимума

и практически остановили его в 2001 году, при этом задача по обеспечению основного объема как грузовых, так и пассажирских перевозок легла на автомобильный транспорт. При этом ныне существующая автомобильная трасса не справлялась с растущим объемом грузоперевозок между Ферганской долиной и другими регионами страны. Так, в зимнее время из-за угрозы схода лавин и плохих погодных условий автотрассу периодически закрывали. В связи с этим в 2013 году правительство Республики Узбекистан приняло решение о строительстве новой однопутной электрифицированной железнодорожной линии Ангрэн — Пап [1].

На основании постановления № ПП-1985 от 18 июня 2013 года первого президента Республики Узбекистан И. А. Каримова было начато строительство электрифицированной железнодорожной линии Ангрэн — Пап [2], являющейся важным звеном международного коридора «Китай — Центральная Азия — Европа». Данная линия является горно-перевальным участком со сложным рельефом и природно-климатическими условиями, проложена на высоте 2200 м над уровнем моря. Железнодорожный участок располагается на горном хребте Курама и пролегает через перевал Камчик. На данном участке вождение грузовых поездов является чрезвычайно сложной задачей из-за особенностей плана и профиля. Так, на отдельных участках пути уклоны при спуске достигают $-29,6\%$, а при подъеме $+28,5\%$, также на участке расположено множество кривых малого радиуса и длины.

Тем не менее достаточно высокий проектный уровень пропускной способности этого участка железной дороги способствует постоянному увеличению объема перевозок (табл. 1), а также сокращению времени доставки грузов и пассажиров до пункта назначения. Особенности плана и профиля пути рассматриваемого участка влекут за собой неравномерный износ оборудования локомотивов и вагонов, ускоренное расходование их ресурса, что приводит к увеличению параметра потока отказов силового и вспомогательного оборудования, узлов и агрегатов в процессе эксплуатации подвижного состава. Все это требует постоянного контроля со стороны локомотивной бригады условий работы оборудования и особенностей реализации силы торможения на спуске и силы тяги при движении на подъеме.

Увеличение объема грузоперевозок потребовало увеличения массы и количества отправляемых грузовых поездов. Для работы в таких сложных условиях эксплуатации локомотивы, находящиеся на тот момент в собственности АО «Узбекистон темир йуллари», не были приспособлены. Отметим, что на момент запуска линии основу парка составляли электровозы переменного тока, выпущенные в СССР и КНР, — ВЛ80С и O`zbekiston соответственно.

В связи с этим для обеспечения необходимого объема перевозок и достижения проектных значений пропускной способности участка железной дороги, расположенного на горном участке, АО «Узбекистон темир йуллари» приобрело новые современные магистральные электровозы переменного тока серий O`ZEL и O`ZELR с асинхронными тяговыми электродвигателями, произведенные в КНР. Данные электровозы

ТАБЛИЦА 1. Динамика объемов перевезенных грузов железнодорожным транспортом

	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Общий объем перевезенных грузов, тыс. т	86 368,6	86 405,6	95 034	94 789,6	95 400	98 880	102 300	103 400
В том числе:								
ввоз	11 463,1	13 059,9	17 982	18 072,1	20 900	18 660	19 500	19 500
вывоз	6114,3	8007,4	8140	8479,2	10 400	11 900	10 900	11 300
транзит	7976,6	7675,1	7234	7270,9	8100	8510	10 200	10 300
местное сообщение	60 814,6	57 663,2	61 678	60 967,4	56 000	59 810	61 700	62 300

оборудованы тяговыми преобразователями на базе *IGBT*-модулей с водяным охлаждением, с микропроцессорным управлением и возможностью поосного регулирования силы тяги, мощностью соответственно 6000 и 7200 кВт.

Для выполнения исследований авторами было разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее выполнять имитационное моделирование движения поезда на рассматриваемом участке для решения поставленных задач по оценке опасных участков и оптимизации режимов ведения поездов.

В разработанном программном обеспечении создана цифровая копия нечетного направления участка линии Пап-2 — Ангрен. В программе реализован железнодорожный путь длиной 122 км с минимальным шагом дискретизации, примененным при описании кривых малого радиуса, равным 1 м. Основная часть пути описана с шагом 100 м, при этом на каждом шаге учитываются величина уклона, радиус кривых и возвышения наружного рельса, а также величина ограничения скорости движения. На рис. 1, а приведен график высоты пути относительно уровня станции Пап-2. На рис. 1, б приведена экранная копия пользовательского интерфейса разработанного программного обеспечения, соответствующего режиму ввода и редактирования параметров железнодорожного пути.

Закупка новых локомотивов, цифровое имитационное моделирование тяговых и тормозных характеристик

Для исследования движения поезда по рассматриваемому участку в разработанном программном обеспечении были заложены предельные тяговые и тормозные характеристики электровозов *O`ZEL* и *O`ZELR* (рис. 2, а, б), для чего были использованы заводские инструкции по данным типам локомотивов [3].

При вождении грузовых поездов, в особенности на участках со сложным горным планом и профилем, в поездах возникают значительной величины продольные растягивающие и сжимающие силы, оказывающие влияние на безопасность движения. Их опасность заключается в потере устойчивости вагонов и, следовательно, значительном увеличении вероятности схода вагонов с рельсов из-за выжимания или выдергивания. Помимо этого, существенную угрозу безо-

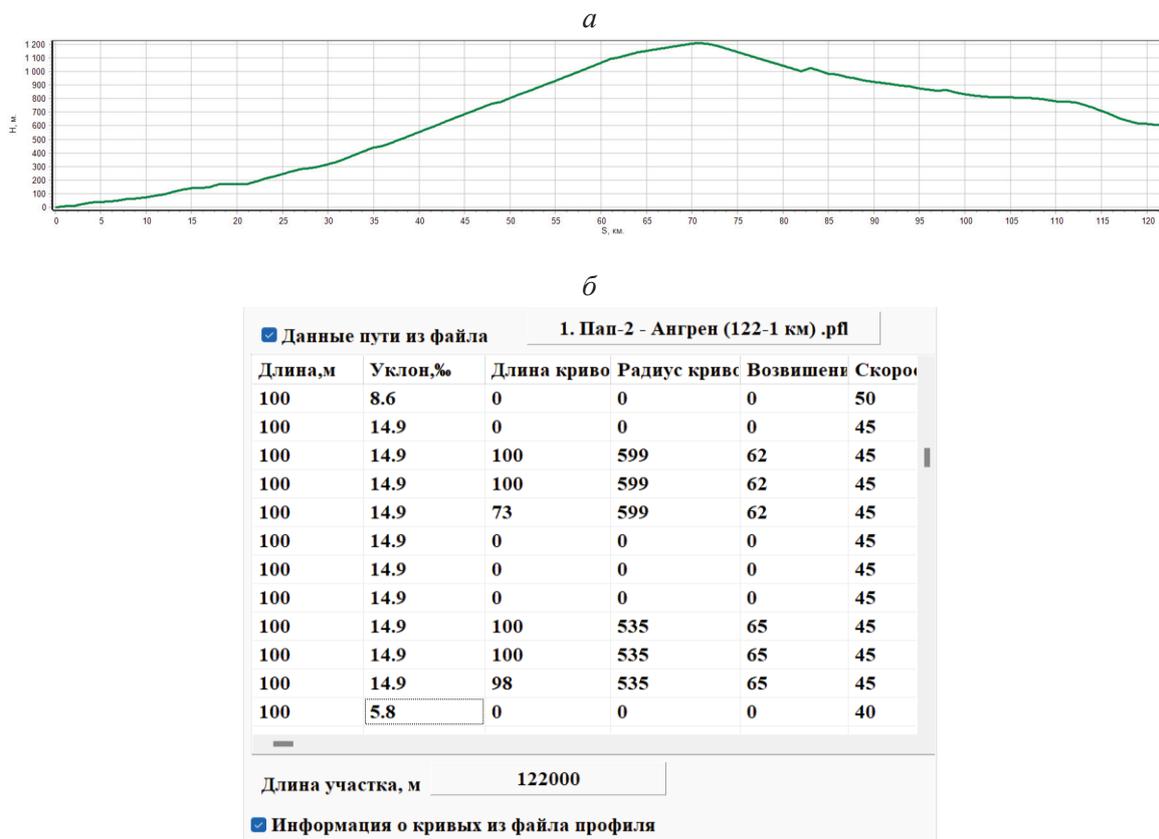


Рис. 1. Построенный горный участок Пап-2 — Ангрен (*a*) и таблица параметров пути (*б*) в программном обеспечении

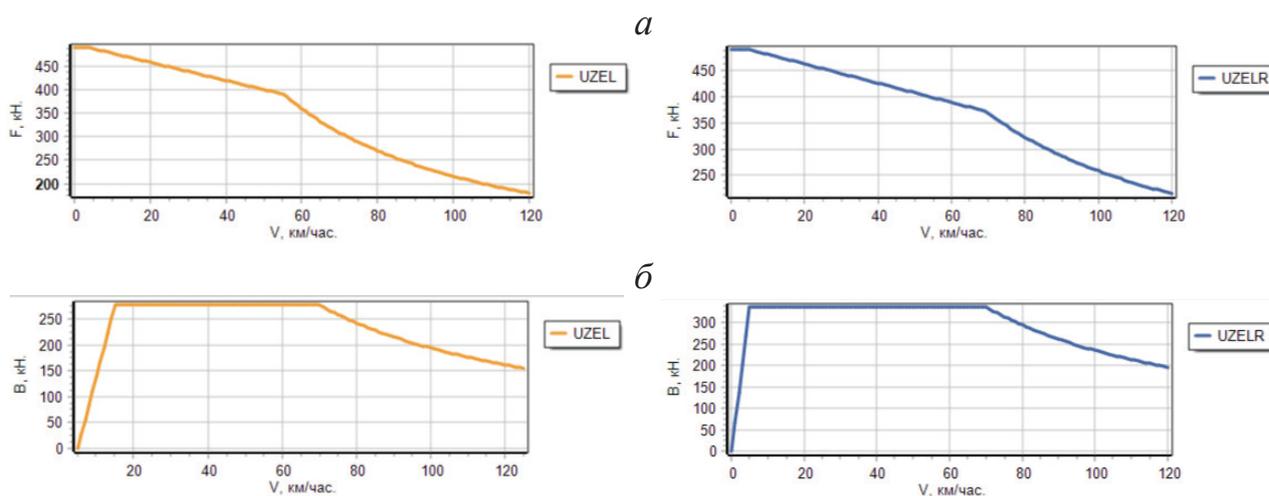


Рис. 2. Тяговая (*a*) и тормозная (*б*) характеристика локомотивов O`ZEL и O`ZELR

пасности движения представляет собой возможное опрокидывание вагонов наружу или внутрь кривой, вероятность чего значительно возрастает вследствие ветровой нагрузки на вагоны, достигающей значительных величин в указанных регионах. Таким образом, определение величин продольных растягивающих и сжимающих сил, а также оценка запаса устойчивости от опрокидывания является одним из наиболее важных аспектов исследования.

Решение уравнения движения поезда и расчет величин продольных квазистатических сил, действующих в поезде

Значительные по величине продольные растягивающие или сжимающие силы, возникающие в составе поезда, влияют как на прочность упряжных приборов и рам вагонов, так и на устойчивость против схода вагона с рельсов [4].

Для вычисления величин продольных квазистатических сил, действующих в грузовом поезде, необходимых для оценки запасов устойчивости вагонов против схода при действии растягивающих и сжимающих продольных сил, а также запаса устойчивости от опрокидывания, была применена математическая модель, реализованная в специальном программном обеспечении. В процессе расчетов учитываются типы локомотивов и вагонов, а также длина, масса каждого экипажа и его расположение на различных элементах профиля и плана пути. Подробное описание модели приведено в работах [5, 6].

Расчет величин, характеризующих запасы устойчивости вагонов при действии продольных сил, а также устойчивости от опрокидывания

При движении поезда по пути ломанного профиля, особенно в процессе торможения поезда с головного локомотива, в составе возникают значительные сжимающие силы. При этом возникает перекосяк вагонов в рельсовой колее, при котором значительно увеличиваются горизонтальные силы, действующие между внутренней поверхностью головки рельса и гребнем набегающей колесной пары, то есть создаются предпосылки для преодоления этими силами сил тяжести и вкатывания гребня колеса на рельс с последующим сходом.

В данной работе рассматривается устойчивость грузовых вагонов, подвергающихся действию продольных сжимающих сил. В качестве критерия устойчивости используется коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельсов при действии сжимающих сил, расчет которого выполняется в соответствии с ГОСТ 33211—2014 «Требования к прочности и динамическим качествам» следующим способом [7].

Движение железнодорожного вагона по криволинейному участку пути сопровождается действием центробежной силы и составляющей силы тяжести, которые при неблагоприятном сочетании с ветровой нагрузкой, а также продольными силами могут привести к опрокидыванию подвижного состава как наружу кривой, так и внутрь. Конструкция вагона и схема закрепления груза, а также устройство верхнего строения пути предполагают достаточный запас устойчивости от опрокидывания. Однако сильный боковой ветер, воздействуя на вагон, создает дополнительную горизонтальную силу, которая может быть направлена как наружу, так и внутрь кривой в зависимости от направления ветра. В результате сложного взаимодействия всех действующих на вагоны сил возникает

результатирующая сила, которая и создает опрокидывающий момент. Для грузовых вагонов коэффициент запаса устойчивости к опрокидыванию определяется в соответствии с ГОСТ 33211—2014 «Требования к прочности и динамическим качествам» следующим способом [7]:

$$K_{\text{ус}} = \frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{дин}}}. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{ст}} = \frac{G_{\text{в}} - 2P_{\text{N}}^{\text{в}}}{2n_{\text{в}}} \quad (2.1) \\ P_{\text{дин}} = \frac{F_{\text{к}}h_{\text{к}} + 2F_{\text{т}}h_{\text{т}} + F_{\text{вк}}h_{\text{вк}} + 2F_{\text{вт}}h_{\text{вт}} + 2P_{\text{N}}^{\text{н}}h_{\text{а}} + G_{\text{к}}\Delta_{\text{к}} + 2G_{\text{т}}\Delta_{\text{т}}}{2Sn_{\text{в}}}, \quad (2.2) \end{array} \right.$$

где $P_{\text{ст}}$ — статическая вертикальная сила, действующая от колеса на рельс, с учетом силы тяжести вагона, Н;

$P_{\text{дин}}$ — динамическая вертикальная сила, действующая от колеса на рельс и перемещений центров тяжести кузова вагона и тележки, Н;

$n_{\text{в}}$ — число осей вагона;

$F_{\text{к}}$ и $F_{\text{т}}$ — боковые силы, действующие соответственно на кузов и тележку, возникающие вследствие центробежного ускорения, Н;

$F_{\text{вк}}$ и $F_{\text{вт}}$ — силы давления ветра, действующие соответственно на кузов и тележку, Н;

$P_{\text{N}}^{\text{в}}$ — вертикальная составляющая продольной силы, действующей на вагон через автосцепку, Н;

$P_{\text{N}}^{\text{н}}$ — боковая составляющая продольной силы, Н;

$G_{\text{в}}$ — сила тяжести вагона, Н;

$G_{\text{к}}$ и $G_{\text{т}}$ — силы тяжести кузова и тележки соответственно, Н;

$h_{\text{к}}$ и $h_{\text{т}}$ — вертикальное расстояние от уровня головок рельсов до центра масс кузова и тележки соответственно, м;

$h_{\text{вк}}$ и $h_{\text{вт}}$ — вертикальное расстояние от уровня головок рельсов до геометрического центра боковой проекции кузова и тележки соответственно, м;

$h_{\text{а}}$ — вертикальное расстояние от уровня головок рельсов до продольной оси автосцепок, м;

$2S$ — расстояние между кругами катания колес в колесной паре, м;

$\Delta_{\text{к}}$ и $\Delta_{\text{т}}$ — боковое перемещение центров тяжести кузова и тележки, м;

В данной работе при определении величины динамической составляющей вертикальной силы $P_{\text{дин}}$, учитывающей действие ветровой нагрузки $F_{\text{вк}}h_{\text{вк}} + 2F_{\text{вт}}h_{\text{вт}}$, будем определять с использованием результатов, полученных при выполнении

аэродинамических расчетов в программном пакете *Solidworks Flow Simulation*, о чем будет сказано далее в настоящем материале. Тогда выражение (2.2) приобретает вид:

$$P_{\text{дин}} = \frac{F_{\text{к}} h_{\text{к}} + 2F_{\text{т}} h_{\text{т}} + F_{\text{в}} h_{\text{к}} + 2P_{\text{н}}^n h_{\text{а}} + G_{\text{к}} \Delta_{\text{к}} + 2G_{\text{т}} \Delta_{\text{т}}}{2Sn_{\text{в}}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{в}}$ — силы давления ветра, действующие соответственно на вагон поезда, определенные с использованием результатов аэродинамического расчета, Н;

Моделирование ветровой нагрузки

Как отмечалось ранее, существенным фактором, влияющим на безопасность движения поездов в условиях движения в ряде регионов, является ветровая нагрузка. Силовой фактор от действующей ветровой нагрузки зависит от скорости и направления ветра, формы и площади поверхности объекта и ряда других факторов.

В работе для определения величин сил, действующих на вагоны поезда в поперечном направлении и вызванных ветровой нагрузкой, была выполнена серия расчетов с использованием модели поезда, разработанной в программе моделирования *SolidWorks*. Для исследования были выбраны цистерна модели 15-2132, полувагон модели 12-132 и крытый вагон модели 11-2135-01, после чего для каждого типа подвижного состава была разработана его геометрическая модель. Далее в приложении *SolidWorks Flow Simulation* был выполнен аэродинамический расчет, позволивший определить величину коэффициента аэродинамического сопротивления вагонов поезда при воздействии на них ветра [8]. Расчет был выполнен при воздействии на вагоны поезда ветра со скоростью 15 м/с при температуре окружающей среды 20 °С, в качестве примера на рис. 3 приведен график зависимости величины силы, действующей на вагоны-цистерны, от номера вагона при угле между вектором скорости ветра и осью пути, составляющем 90 градусов. При данных начальных условиях величины сил, действующих на вагоны поезда, незначительно отличаются друг от друга при изменении номера вагона (за исключением первого и последнего экипажей в поезде), однако значительно зависят от типа исследованного вагона (рис. 3).

Для определения коэффициента аэродинамического сопротивления была использована известная формула [9]:

$$F_{\text{в}} = C \frac{\rho v_{\text{в}}^2}{2} S_{\text{п}}, \quad (4)$$

где $v_{\text{в}}$ — скорость ветра, м/с;
 ρ — плотность воздуха, кг/м³;
 $S_{\text{п}}$ — площадь боковой проекции вагона, м²;
 C — коэффициент аэродинамического сопротивления.

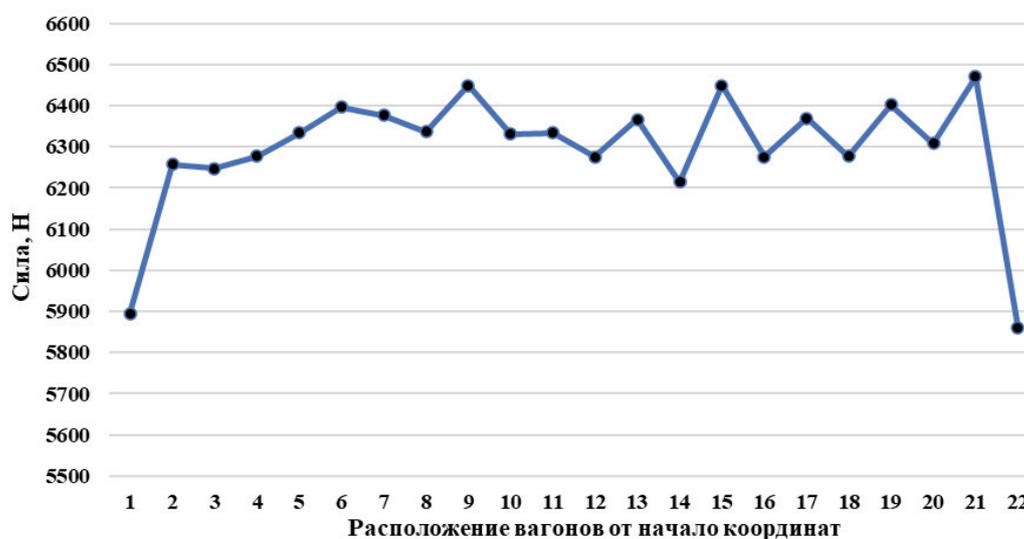


Рис. 3. Силы, действующие на состав из вагонов-цистерн

В табл. 2 приведены значения величин коэффициента аэродинамического сопротивления для вагонов исследованных типов при направлении ветра 90° относительно оси пути.

ТАБЛИЦА 2. Значения величин коэффициента аэродинамического сопротивления для вагонов разных типов

Коэффициент аэродинамического сопротивления при направлении ветра 90° к оси пути	Тип вагона		
	крытый	полувагон	цистерна
C	0,867	1,118	1,039

Как видно из таблицы, в ряде случаев величина коэффициента аэродинамического сопротивления превышает 1, поэтому величины сил, действующих на вагоны поезда и определенных с использованием найденного в результате выполнения расчета коэффициента аэродинамического сопротивления, более чем на 10 % отличаются от величин сил, определенных в соответствии со стандартной методикой, предполагающей их определение без учета данного коэффициента [9].

С использованием полученных значений коэффициента аэродинамического сопротивления для произвольного значения скорости могут быть найдены величины сил, действующих на вагоны поезда, которые в последующем используются при определении величин коэффициентов запаса устойчивости от опрокидывания (динамической составляющей вертикальной силы) в формуле (3).

С целью определения опасных климатических факторов были проанализированы погодные условия на железнодорожном участке Пап-2 — Ангрэн. Из совокупности данных выделена информация о наибольшем зарегистрированном значении скорости ветра за последние 20 лет [10]. Полученные результаты приведены на рис. 4.

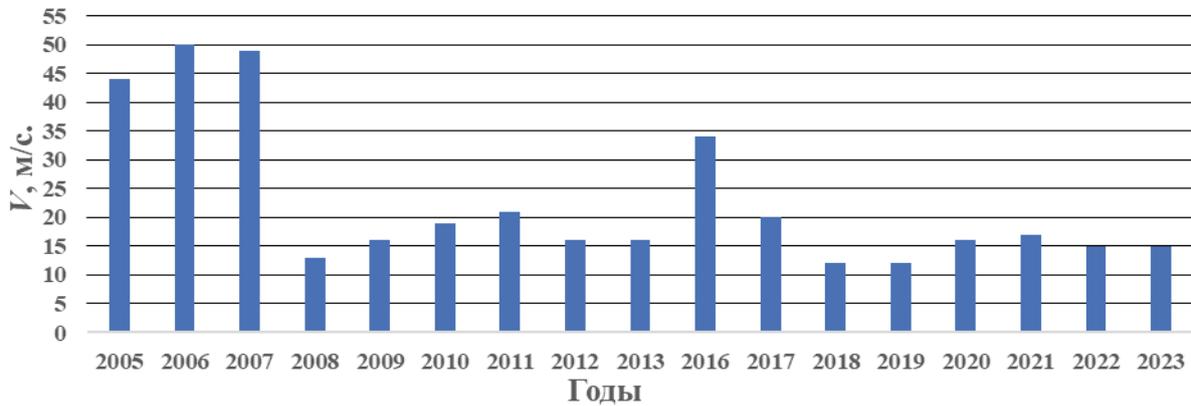


Рис. 4. Максимальные значения скорости ветра на горно-перевальном железнодорожном участке Пап-2 — Ангрэн

Как видно, на протяжении последних 20 лет самые высокие скорости ветра были зафиксированы в 2006 и 2007 годах, когда они составили соответственно 50 и 49 м/с, в дальнейшем произошло практически двукратное снижение значений пиковых скоростей ветра, однако нельзя исключать повторения более опасных скоростей ветра. В связи с этим дальнейшие расчеты были выполнены с учетом скоростей ветра, составляющих 22 м/с.

Анализ результатов расчетов и моделирование

В специализированном программном обеспечении было исследовано движение грузового поезда, состоящего из двух локомотивов серии *O'ZELR* и 55 одно-типных порожних вагонов-цистерн модели 15-2132. Параметры поезда выбраны исходя из нормативной документации по условной длине и весу грузового поезда в данном участке пути [11]. Общий вес грузового поезда составил 1761 тонну, длина поезда — около 705 метров. Скорость ветра, воздействующего на грузовой поезд, принята равной 22 м/с при температуре окружающей среды 20 °С. Было исследовано движение поезда по участку с профилем и планом, соответствующим аналогичным параметрам участка Пап-2 — Ангрэн (рис. 1, а). Движение поезда осуществлялось в режиме поддержания скорости в соответствии со значениями, установленными режимной картой данного участка [12]. В результате выполнения расчетов были найдены зависимости от координаты силы тяги $F_k(s)$, скорости $V(s)$, коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельсов при выжимании вагона $K_{yc}(s)$ и коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания $K_{yco}(s)$. Данные графики приведены на рис. 5, а–в, 6.1, а–в и 6.2, а–в соответственно.

Расчеты показали, что минимальное значение коэффициента запаса устойчивости от схода при выжимании достигает на всей протяженности пути величины $K_{yc} = 1,5$ (рис. 5, в) при движении по прямому участку пути на спуске $i = -25,1\%$, в режиме торможения с тормозной силой $\hat{A} = 600$ кН (рис. 5, а) для снижения

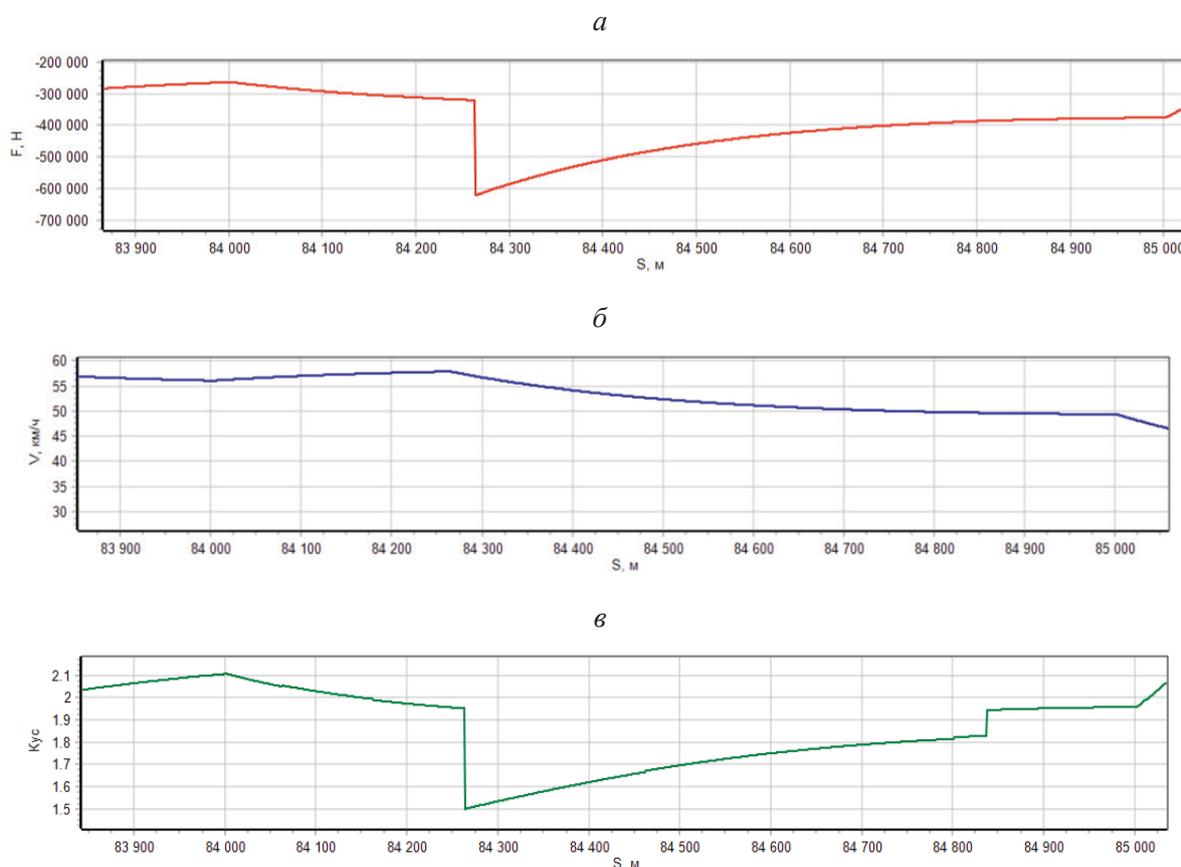


Рис. 5. Графики изменения силы тяги локомотива F_k (*a*), скорости подвижного состава (*б*), устойчивости вагона от схода при выжимании K_{yc} без влияния силы ветра (*в*) в пути

скорости от $v = 57,78$ км/час до $v = 45$ км/час (рис. 5, *б*). Таким образом, запас устойчивости грузового поезда от схода с рельсов при выжимании остается достаточным, превышая установленный предельно допустимый минимум, равный $K_{yc} = 1,3$ [7].

Приведенный анализ результатов по определению коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания в условиях движения при воздействии бокового ветра выявил 2 критических случая (рис. 6.1 и 6.2), которые могут повлиять на безопасность движения грузового поезда на данном участке пути.

В первом случае было выявлено, что коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания наружу кривой при воздействии бокового ветра на грузовой поезд снижается ниже допустимого минимального уровня, составляющего $K_{yc0} = 1,3$ и достигает $K_{yc0} = 1,21$ (рис. 6.1, *в*). Это происходит при движении грузового поезда по кривому участку с радиусом 308 м и возвышением наружного рельса 40 мм с максимальной скоростью $v = 59,47$ км/час (рис. 6.1, *б*). Величина коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания снижается при движении по площадке с максимальной установленной для данного участка скоростью [12], между отметками пути с координатами 15 200 м и 15 700 м. Сила тяги при этом сначала

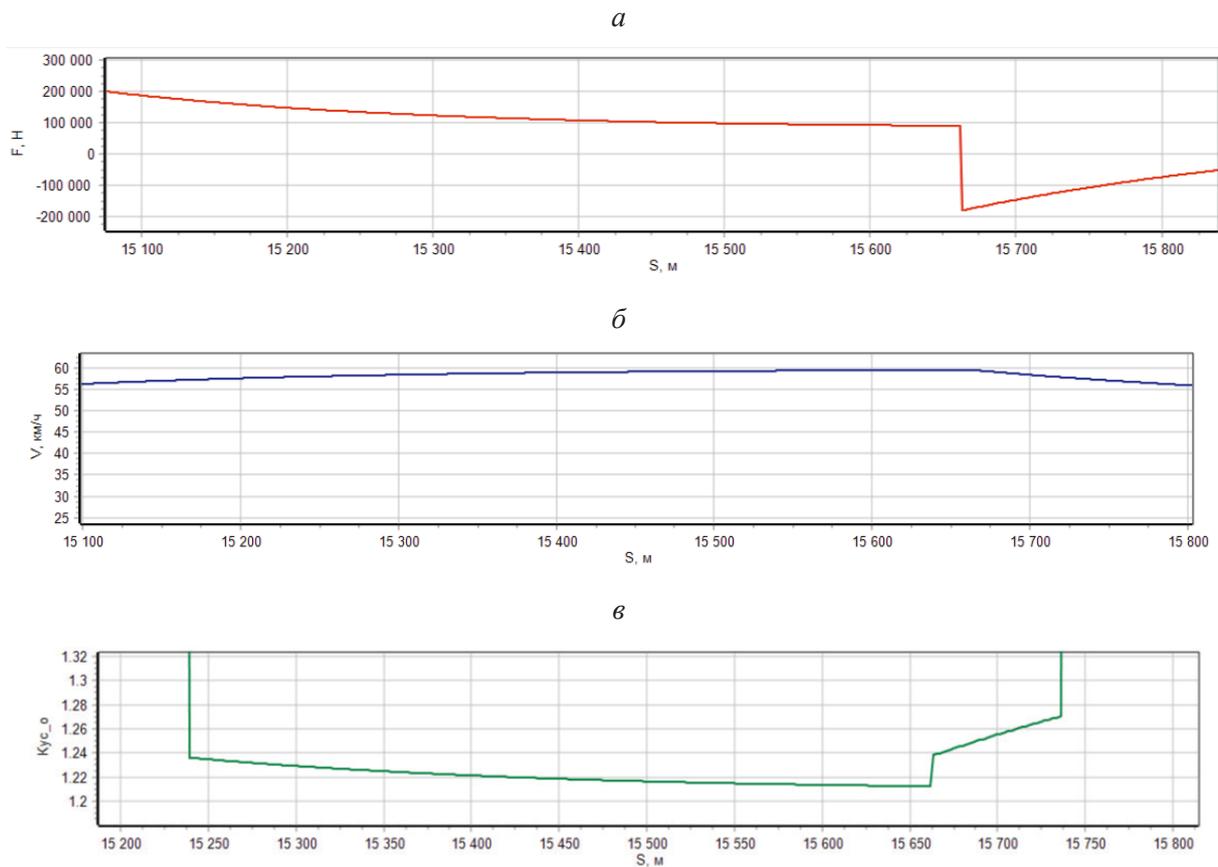


Рис. 6.1. Графики изменения силы тяги локомотива F_k (а), скорости подвижного состава (б), устойчивости вагона от опрокидывания K_{yc_0} с влиянием силы ветра (в) к пути

равномерно уменьшается от 580 до 90 кН, после чего локомотив переходит в режим торможения с увеличением тормозной силы до 180 кН, необходимой для снижения скорости движения (рис. 6.1, а).

Во втором случае также было определено, что коэффициент запаса устойчивости от опрокидывания наружу кривой под воздействием бокового ветра снижается ниже допустимого минимального уровня, достигая значения $K_{yc_0} = 1,27$ и $K_{yc_0} = 1,24$ (рис. 6.2, в). Как и ранее, данная ситуация возникает при движении грузового поезда по кривым участкам пути с радиусом 307 м и 302 м, с возвышением наружного рельса 53 мм и 38 мм соответственно с максимальной скоростью $v = 58,82$ км/час (рис. 6.2, б). Снижение коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания происходит на спуске $i = -18,1\%$, когда грузовой поезд переходит с одного кривого участка пути в другой с максимальной скоростью по координате от 83 300 до 83 850 м. График изменения силы, реализуемой тяговым электроприводом при движении по данному участку, приведен на рис. 6.2, а.

Для предотвращения возникновения ситуаций, угрожающих безопасности движения поездов, целесообразно выполнять корректировку режимов движения при нахождении поезда в кривой малого радиуса. К таким мероприятиям относятся:

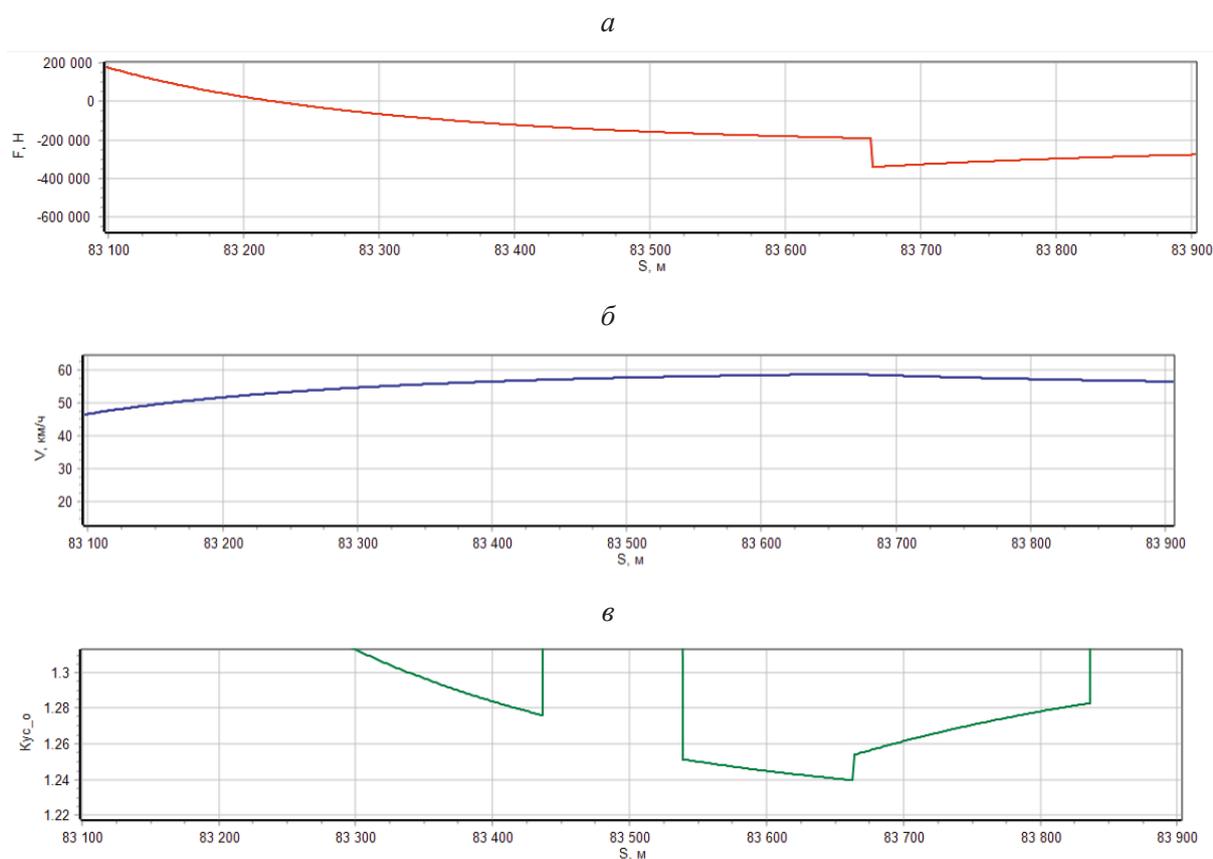


Рис. 6.2. Графики изменения силы тяги локомотива F_k (а), скорости подвижного состава (б), устойчивости вагона от опрокидывания K_{yc_0} с влиянием силы ветра (в) к пути

1. Корректировка скорости грузового поезда в кривых малого радиуса для повышения коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания при воздействии бокового ветра. Выполненные расчеты показали эффективность предлагаемого мероприятия. Так, при движении по последнему из рассмотренных участков снижение величины заданной скорости с 59,47 до 49 км/ч и с 58,82 до 50 км/ч привело к соответствующему снижению величин продольных сил и увеличению коэффициента запаса устойчивости от опрокидывания подвижного состава с $K_{yc_0} = 1,21$ до $K_{yc_0} = 1,38$ и с $K_{yc_0} = 1,24$ до $K_{yc_0} = 1,33$ соответственно, то есть до уровня, допустимого по условиям безопасности движения.

2. Внедрение систем мониторинга и управления движением, позволяющих заранее предсказывать и корректировать параметры движения грузового поезда в горных условиях.

Также целесообразно внедрение ряда организационных мероприятий, способствующих повышению безопасности движения поездов в горных условиях, а именно:

– проведение тренингов для локомотивных бригад по безопасному и эффективному управлению составами в условиях сложного рельефа и ветровых нагрузок, включая техники управления и реакции на изменения в поведении поезда;

– проведение регулярных проверок состояния инфраструктуры и подвижного состава для выявления и устранения недостатков, влияющих на безопасность движения;

– установка ветровых экранов: то есть использование специальных экранов вдоль железнодорожных путей в ветреных районах для уменьшения скорости ветра, действующего на грузовые поезда.

Заключение

В результате проведенного исследования устойчивости вагонов грузового поезда в условиях горно-перевального профиля и при воздействии ветровых нагрузок было установлено, что величины продольных сил существенно влияют на обеспечение безопасности движения. Разработанное специализированное программное обеспечение для цифрового имитационного моделирования позволяет эффективно анализировать поведение поездов в сложных условиях, заранее выявляет при моделировании потенциально опасные участки железнодорожной пути, что позволяет оптимизировать управление движением и улучшить режимы ведения поездов. Результаты работы подчеркивают необходимость комплексного подхода к обеспечению безопасности железнодорожного транспорта, что является особенно актуальным в условиях постоянно увеличивающихся объемов грузоперевозок при сложных природных условиях. Внедрение предложенных мероприятий может значительно снизить риски, связанные с потерей устойчивости вагонов, и повысить общую надежность грузовых перевозок. Таким образом, результаты данного исследования могут служить основой для дальнейших разработок в области повышения надежности и безопасности грузовых перевозок, что, в свою очередь, способствует устойчивому и эффективному развитию железнодорожного транспорта в сложных природно-климатических условиях.

Список источников

1. Умаров Х. К. Увеличение пропускной способности лимитирующего перегона линии Ангрэн — Пап / Х. К. Умаров, Е. С. Свинцов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 2(43). — С. 84–90.

2. Постановление Президента Республики Узбекистан от 18.06.2013 № ПП-1985 «О мерах по организации строительства электрифицированной железнодорожной линии «Ангрэн — Пап». — URL: <https://lex.uz/acts/2756024> (дата обращения: 09.09.2024).

3. Инструкция по эксплуатации электровозов UZEL и UZELR. — Ташкент: АО «УТЙ», 2013. — 122 с.

4. 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.
5. Кахрамонов Ш. Н. Математическая модель поезда для исследования квазистатических продольных сил в грузовом поезде при движении по горно-перевальному профилю / Ш. Н. Кахрамонов, О. Е. Пудовиков, Н. О. Жухин // Повышение эффективности использования подвижного состава железных дорог. — 2024. — С. 11–23.
6. Кахрамонов Ш. Н. Влияния режимов движения и профиля пути на величины квазистатических сил в грузовом поезде на горных участках / Ш. Н. Кахрамонов, О. Е. Пудовиков, Н. О. Жухин // Молодая наука Сибири. — 2024.
7. ГОСТ 33211—2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. — М.: Стандартинформ, 2016. — 54 с.
8. Алямовский А. А. Инженерные расчеты и SolidWorksSimulation / А. А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 464 с.
9. Петров К. П. Аэродинамика тел простейшей формы / К. П. Петров. — М.: Физматлит, 1998. — 428 с.
10. Архив погоды в Камчике. — URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Камчике (дата обращения: 15.09.2024).
11. Нормативная документация по условной длине и весу грузового поезда. — Ташкент: АО «УТЙ», 2024. — 12 с.
12. Нормативная документация по установленной скорости грузовых и пассажирских поездов. — Ташкент: АО «УТЙ», 2022. — 7 с.

Дата поступления: 15.02.2025

Решение о публикации: 25.03.2025

Контактная информация:

ПУДОВИКОВ Олег Евгеньевич — д-р техн. наук, доц.; oleger@mail.ru

КАХРАМОНОВ Шохрух Наримон угли — аспирант; qahramonovsh1995@gmail.com

A Model to Study the Stability of Freight Train Wagons Moving in Conditions of Mountain Pass Profile and Wind Loads

O. E. Pudovikov, Sh. N. Kakhramonov

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obratsova str., OCP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Pudovikov O. E., Kakhramonov Sh. N. A Model to Study the Stability of Freight Train Wagons Moving in Conditions of Mountain Pass Profile and Wind Loads. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 7–23. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-7-23

Summary

Purpose: A freight train model is presented to analyze the train stability moving on mountainous railway sections. Special attention is paid to the impact of wind loads on the safety factor against overturning. On the Angren — Pape railway, Republic of Uzbekistan, the railway sections with the most pronounced tendency of wagons to overturn, especially under the action of wind loads, have been identified based on the analysis of operational maps and information on weight standards established for this section. This article highlights the importance of efficient and safe operation of rolling stock to ensure cargo safety in difficult mountain conditions including steep climbs and descents and small-radius curves. **Methods:** The influence of longitudinal forces on the stability of wagons against overturning was investigated including the exposure to winds acting along the normal axis of the track. The authors have developed a specialized software that allows performing simulation modelling of the movement of trains of different composition on a track with variable plan and profile taking into account the construction parameters of the track superstructure for the stability analysis of the wagons. The results obtained were analyzed allowing dangerous sections to be identified and the train operating modes to be further adapted to improve transport safety. To determine the magnitude of the wind forces acting on the train wagons, an aerodynamic calculation was performed using a train model developed in the SolidWorks modelling programme. **Results:** The values of the aerodynamic drag coefficients for different types of wagons have been calculated and the dangerous sections with the most pronounced wagon overturning tendency have been identified. **Practical significance:** Specialized software has been developed for the hazard analysis. The possibility of optimizing freight train control modes to improve train safety in complex mountainous terrain under the influence of wind loads has been demonstrated.

Keywords: Mountain pass area, traction and braking characteristics, specialized software, SolidWorks, Flow Simulation, wind load, longitudinal quasi-static forces, train model, safety factor against overturning, stability of wagons.

References

1. Umarov Kh. K., Svintsov E. S. Uvelichenie propusknoy sposobnosti limitiruyushchego pereгона linii Angren — Pap [Increasing the capacity of the limiting section of the Angren — Pap line]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2015, Iss. 2(43), pp. 84–90. (In Russian)

2. *Postanovlenie Prezidenta Respubliki Uzbekistan ot 18.06.2013 № PP-1985 “O merakh po organizatsii stroitel'stva elektrifitsirovannoy zheleznodorozhnoy linii “Angren — Pap”* [Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated 18.06.2013 № PP-1985 “On measures to organize the construction of the electrified railway line “Angren — Pap”]. Available at: <https://lex.uz/acts/2756024> (accessed: September 9, 2024). (In Russian)

3. *Instruktsiya po ekspluatatsii elektrovozov UZEL i UZELR* [Operating instructions for UZEL and UZELR electric locomotives]. Tashkent: AO “UTY”, 2013, 122 p. (In Russian)
4. Vershinskiy S. V., Danilov V. N., Khusidov V. D. *Dinamika vagona: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp.; pod red. S. V. Vershinskogo, 3-e izd., pererab. i dop.* [Car dynamics: a textbook for higher education institutions of railway transport; edited by S. V. Vershinsky, 3rd ed., revised and enlarged]. Moscow: Transport Publ., 1991, 360 p. (In Russian)
5. Kakhramonov Sh. N., Pudovikov O. E., Zhukhin N. O. Matematicheskaya model' poezda dlya issledovaniya kvazistaticheskikh prodol'nykh sil v gruzovom poezde pri dvizhenii po gornopereval'nomu profilu [Mathematical model of a train for studying quasi-static longitudinal forces in a freight train moving along a mountain pass profile]. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya podvizhnogo sostava zheleznikh dorog* [Improving the efficiency of using rolling stock of railways]. 2024, pp. 11–23. (In Russian)
6. Kakhramonov Sh. N., Pudovikov O. E., Zhukhin N. O. Vliyaniya rezhimov dvizheniya i profilya puti na velichiny kvazistaticheskikh sil v gruzovom poezde na gornykh uchastkakh [Effects of traffic modes and track profile on the magnitude of quasi-static forces in a freight train on mountainous sections]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia]. 2024. (In Russian)
7. *GOST 33211—2014. Vagony gruzovye. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST 33211—2014. Freight cars. Requirements for strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2016, 54 p. (In Russian)
8. Alyamovskiy A. A. *Inzhenernye raschety i SolidWorksSimulation* [Engineering calculations and SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press Publ., 2010, 464 p. (In Russian)
9. Petrov K. P. *Aerodinamika tel prosteyshyey formy* [Aerodynamics of bodies of the simplest form]. Moscow: Fizmatlit Publ., 1998, 428 p. (In Russian)
10. *Arkhiv pogody v Kamchike* [Weather archive in Kamchik]. Available at: https://rp5.ru/Arkhiv_pogody_v_Kamchike (accessed: September 15, 2024). (In Russian)
11. *Normativnaya dokumentatsiya po uslovnoy dline i vesu gruzovogo poezda* [Regulatory documentation on the nominal length and weight of a freight train]. Tashkent: AO “UTY”, 2024, 12 p. (In Russian)
12. *Normativnaya dokumentatsiya po ustanovlennoy skorosti gruzovykh i passazhirskikh poezdov* [Regulatory documentation on the established speed of freight and passenger trains]. Tashkent: AO “UTY”, 2022, 7 p. (In Russian)

Received: February 15, 2025

Accepted: March 25, 2025

Author's information:

Oleg E. PUDOVIKOV — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; olegep@mail.ru

Shohruh N. KAHRAMONOV — Postgraduate Student; qahramonovsh1995@gmail.com