

**Пудовиков О.Е.<sup>1</sup>, Кахрамонов Ш.Н.<sup>1</sup>, Жухин Н.О.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

## **ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ И ПРОФИЛЯ ПУТИ НА ВЕЛИЧИНЫ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ СИЛ В ГРУЗОВОМ ПОЕЗДЕ НА ГОРНЫХ УЧАСТКАХ**

***Аннотация.** В железнодорожном транспорте на сегодняшний день одним из актуальных задач является обеспечение высоко эффективного управления с минимальными расходами длинно составных и тяжеловесных грузовых поездов при эксплуатации в горных местностях. Исходя из несколько ряд основных, дополнительных факторов и режимов движения обеспечения безопасности в горных участках является наиболее одним из сложных, актуальных задач при крутых подъемах, спусках и кривых малого радиуса и длины. Целесообразным будет исследование квазистатических, продольно растягивающих сил и устойчивости вагонов при движении подвижного состава с использованием математические модели и современные программные обеспечения. Исходя из этого было разработано математический модель грузового поезда и внесен в программную обеспечению.*

***Ключевые слова:** грузовые поезда, режимы движения, горный участок, квазистатические силы, продольно растягивающие силы, устойчивость вагона, математическая модель, программное обеспечение.*

**Pudovikov O.E.<sup>1</sup>, Kahramonov SH.N.<sup>1</sup>, Zhukhin N.O.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

## **THE INFLUENCE OF TRAFFIC MODES AND TRACK PROFILE ON THE MAGNITUDE OF QUASI-STATIC FORCES IN A FREIGHT TRAIN IN MOUNTAINOUS AREAS**

***Abstract.** In railway transport today, one of the urgent tasks is to ensure highly efficient management with minimal costs of long-haul and heavy-duty freight trains when operating in mountainous areas. Based on a number of basic, additional factors and driving modes, ensuring safety in mountainous areas is the most difficult, urgent task for steep ascents, descents and curves of small radius and length. It would be advisable to study the quasi-static, longitudinally tensile forces and stability of wagons during the movement of rolling stock using mathematical models and modern software. Based on this, a mathematical model of a freight train was developed and introduced into the software.*

***Keywords:** freight trains, modes of movement, mountain section, quasi-static forces, longitudinal tensile forces, wagon stability, mathematical model, software.*

### **Введение**

В современном развивающемся мире во многих странах развивается железнодорожная транспортная инфраструктура. С увеличением транзитных и местных грузовых перевозок увеличивается количество отправляемых грузов, повышая использование текущей провозной и пропускной способности путей сообщения. Одним из путей решения данной проблемы на железнодорожном транспорте является увеличение массы и длина грузовых поездов, для чего внедряются в эксплуатацию современные мощные локомотивы. При ведении таких поездов значительно возрастают продольные силы, действующие в переходных и установившемся режимах движения. Подобное увеличение продольных сил ухудшает условия движения вагонов поезда в рельсовой колее и способствует возникновению предпосылок для потери ими устойчивости с последующим сходом. Данная ситуация особенно опасна при движении поезда по участкам пути с кривыми малого радиуса и значительным возвышением наружного рельса, при повышенных скоростях движения, а также при действии значительной ветровой нагрузки на вагоны поезда. Таким образом, задача исследования и изучения влияния режимов движения и профиля пути на величины продольных сил при ведении тяжеловесных длинно составных грузовых поездов в условиях сложного профиля, в том числе на горных участках, является актуальной.

При ведении различают 3 основных режимов движения поезда: тяга, выбег и торможение.

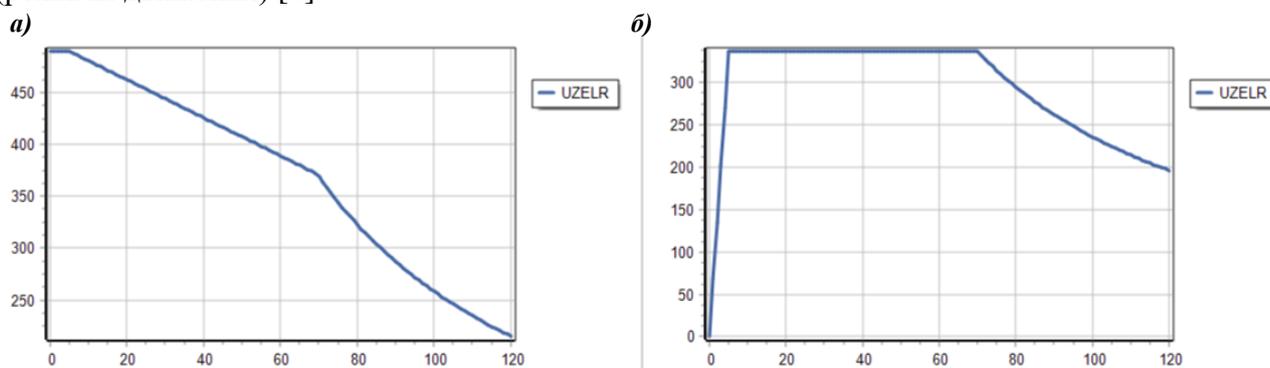
- В режиме тяги поезд движется за счёт механической энергии, в основном вырабатываемой локомотивом из первичной энергии, а также за счёт накопленной ранее механической энергии (кинетической и потенциальной);
- В режиме выбега локомотив не создаёт силу тяги и поезд движется по инерции за счёт накопленной ранее механической энергии (кинетической и потенциальной);
- В режиме торможения на поезд действует сила торможения, а также силы сопротивления движению [1].

При выборе рационального режима для ведения грузового поезда по горному участку нужно учитывать множество влияющих основных и дополнительных факторов. К таким факторам относятся: квалификация локомотивной бригады (человеческий фактор), техническое состояние подвижного состава, профиль пути (кривые, подъёмы и спуски), климатические условия (дождь, снег, боковой ветер, туман, град), особенности грузов (насыпные, навалочные, наливные, скоропортящиеся, опасные и легкогорючие), и т. д.

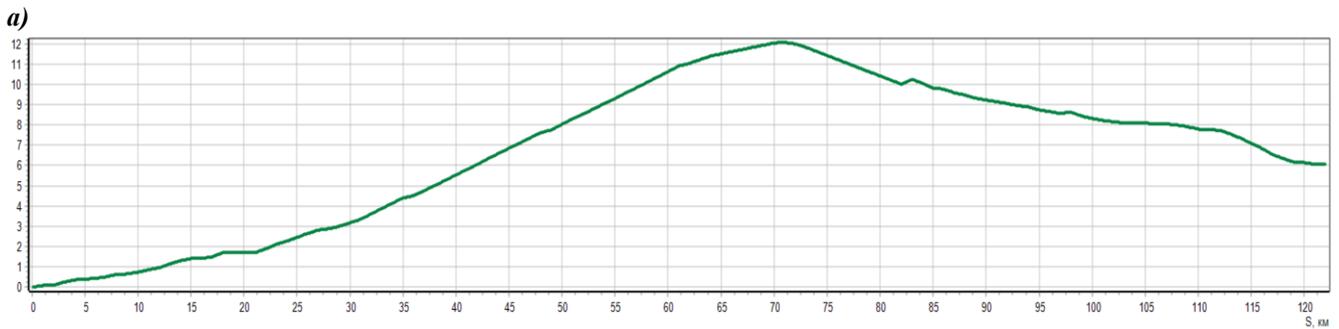
Выбор режима движения поезда и величин тяговых или тормозных сил оказывает существенное влияние на значения и характер изменения продольных сил в поезде. В установившемся режиме движения или при медленно изменяющихся внешних силах характер продольных сил является квазистатическим, в переходных режимах – динамическим, сопровождающимся колебаниями значительной амплитуды, толчками и рывками в поезде [3]. Величины квазистатических сил оказывают влияние на факторы, характеризующие устойчивость вагонов в колее от выжимания или выдёргивания при движении в кривых участках пути. Особенно важным является исследование этих сил при движении в кривых малого радиуса, характерных для железнодорожных горных участков с перевалистым профилем. Помимо величин продольных сил, на устойчивость вагонов влияют также осевая нагрузка, возвышение рельсов в кривых участках пути, центробежные силы, а также силовой фактор ветровой нагрузки. Всё это в сочетании с уклоном значительной величины оказывает существенное влияние на безопасность движения поездов.

#### **Цифровая имитационное моделирование железнодорожного пути, тяговых и тормозных характеристик локомотива**

Для выполнения исследований в настоящей работе выбран электрифицированный по системе переменного тока участок Ангрэн–Пап с протяжённостью 122 километра. С точки зрения эксплуатации грузовых поездов, на этой линии является сложным участком с горным перевальным профилем, где в отдельных местах уклон на подъёме достигает + 29,6 %, а при спуске достигает – 28,5 % (рисунок – 2), встречаются многочисленные кривые малого радиуса до 269 м и длиной 135 м. Подобные условия приводит к необходимости постоянного контроля со стороны локомотивной бригады всех параметров поезда, силы торможения на спуске, силы тяги при подъёме (рисунок – 1), работу МСУД и системы автоматического ведения поезда (режимы движения) [4].



**Рисунок – 1. Тяговая  $F_k(v)$  (а) и тормозная  $B(v)$  (б) характеристика локомотива UZELR.**



б)

Данные пути из файла 5. Ангрен-Пап-2 (1-122 км).рfl

Длина,м	Уклон,‰	Длина крив	Радиус кр	Возвышения	Скорость,к
100	20.7	100	1352	49	40
100	20.7	100	1352	49	40
100	29.6	100	1352	49	35
100	29.6	27	1352	49	35
100	29.6	100	408	51	35
100	29.6	100	408	51	35
100	29.6	100	408	51	35
100	29.6	22	408	51	35
100	29.6	0	0	0	35
100	29.6	0	0	0	35
100	29.6	0	0	0	35
100	29.6	0	0	0	35
100	25.7	100	683	47	35
100	25.7	84	683	47	35

Длина участка, м 122000

Информация о кривых из файла профиля

Рисунок – 2. Построенный горный участок Пап-2 – Ангрен (а) и таблица параметров пути (б) в программном обеспечении.

**Решение управления движения поезда, определение величин продольных сил, действующих в поезде.**

Для решения задач, связанных с выбором рациональных по критерию устойчивости вагонов режимов движения поезда, разработана математическая модель движения поезда, а также программное обеспечение, реализующее эту модель. Она учитывает конечную длину и тип вагонов и локомотивов, а также массу и расположение их на различных элементах плана и профиля пути [5].

Движения поезда моделируется путём решения следующей системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv}{dt} \cdot \sum_{i=1}^k (m_i \cdot (1 + \gamma_i)) = \sum_{n=1}^a F_{kn} - \sum_{i=1}^k W_i - \sum_{i=1}^k B_{Ti} \\ \sum_{i=1}^k W_i = \sum_{i=1}^k W_{oi} + \sum_{i=1}^k W_{di} \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $(1 + \gamma_i)$  – коэффициент инерции вращающихся частей  $i$ -го экипажа;

$m_i$  – масса  $i$ -го экипажа;  
 $a$  – количество локомотивов в поезде;  
 $k$  – общее количество экипажей (локомотивов и вагонов) в поезде;  
 $v$  – скорость движения поезда;  
 $F_k$  – сила тяги  $a$ -го локомотива;  
 $W_i$  – сила сопротивления движению  $i$ -тому экипажу;  
 $B_{\tau i}$  – сила торможения  $i$ -го экипажа.

В свою очередь, величина сопротивления движению каждого экипажа:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{oi} = \begin{cases} (1,9 + 0,01 \cdot v + 0,0003 \cdot v^2) \cdot P_i, \text{ если } i = n_{лк}, k = 1..a \\ \left( 0,7 + \frac{3 + 0,1 \cdot v + 0,0025 \cdot v^2}{q_{0j}} \right) \cdot Q_i, \text{ если } i = n_{вj}, j = 1..b \end{cases} \\ \sum_{i=1}^k W_{di} = f(S_i) + w_r \\ w_r = \frac{200}{R} + 1,5 \cdot \tau_k \\ \tau_k = \frac{v^2}{13 \cdot R} - \frac{h_p}{2S_x} \cdot g \end{array} \right. \quad (2)$$

$n_{лк}$  – номер локомотива как экипажа в составе поезда;  
 $n_{вj}$  – номер вагона как экипажа в составе поезда;  
 $P_i$  – вес локомотива;  
 $Q_i$  – вес  $i$ -го вагона;  
 $b$  – количество вагонов в поезде;  
 $q_{0j}$  – приходящийся нагрузка на ось одной колёсной пары;  
 $W_{oi}$  – основное удельное сопротивление движению  $i$ -тому экипажу;  
 $W_{di}$  – дополнительное удельное сопротивление движению  $i$ -тому экипажу;  
 $S_i$  – пройденный путь  $i$ -го экипажа;  
 $w_r$  – дополнительное удельное сопротивление движению от кривой;  
 $\tau_k$  – непогашенное ускорение в кривой;  
 $R$  – радиус кривой;  
 $h_p$  – возвышение наружного рельса;  
 $2S_x$  – расстояние между кругами катания колес подвижного состава, (1600 мм);  
 $g$  – ускорение свободного падения;

Определение величин продольных квазистатических сил, действующих в поезде, выполняется в соответствии с расчётной схемой поезда, приведённой на рисунке 3.

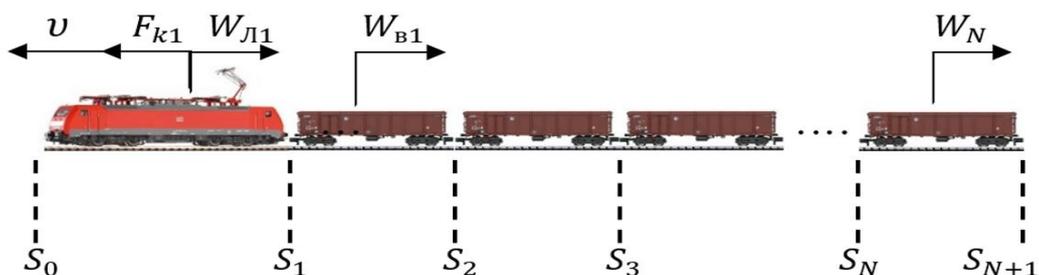


Рисунок 3. Схема поезда по расположению действующих сил и меж вагонных соединений. где S – меж экипажное соединение

Определение продольных квазистатических сил выполняется путём решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} m_{л1} \frac{dv}{dt} = F_{k1} - W_{л1} - S_1 \\ m_{в1} \frac{dv}{dt} = S_1 - W_{в1} - S_2 \\ m_{в2} \frac{dv}{dt} = S_2 - W_{в2} - S_3 \\ \dots \\ m_{вN} \frac{dv}{dt} = S_{N-1} - W_{л} - S_N \end{cases} \quad (3)$$

Откуда

$$\begin{cases} S_0 = F_{k1} \\ S_1 = F_{k1} - W_{л1} - m_{л1} \frac{dv}{dt} \\ S_2 = S_1 - W_{в1} - m_{в1} \frac{dv}{dt} \\ S_3 = S_2 - W_{в2} - m_{в2} \frac{dv}{dt} \\ \dots \\ S_N = S_{N-1} - W_{вN} - m_{вN} \frac{dv}{dt} \\ S_{N+1} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Значительные по величине продольные растягивающие силы, возникающие в составе тяжеловесного длинно составного поезда, влияют как на прочность упряжных приборов и рам вагонов, так и на устойчивость против схода вагона с рельсов. На кривом участке пути вагоны в плане располагаются под углом друг к другу и возникающие горизонтальные составляющие продольных растягивающих сил  $S$  направленные к центру кривой радиусом  $R$ , приводят к перегрузке внутреннего рельса и разгрузке наружного [2].

#### Расчёт величин показателей устойчивости вагонов.

За критерий устойчивости вагона в этом случае следует принимать вертикальную реакцию  $R_A$  наружного рельса на колеса вагона, при этом необходимо соблюдать условие

$$R_A > 0 \quad (5)$$

При действии продольных растягивающих сил, из условия равновесия вагона, находящегося на железнодорожном пути, определим устойчивости вагона в виде

$$R_A = \frac{Q}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{h_{ц}}{S_x \cdot g} \cdot \left( \frac{v^2}{R} - \frac{h_p}{2 \cdot S_x} \cdot g \right) \right] \pm p_B \cdot S_{п} \cdot \frac{h_B}{2 \cdot S_x} - N \cdot \frac{L_c \cdot h_a}{S_x \cdot R} > 0 \quad (6)$$

Откуда

$$R_A = \frac{Q}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{h_{ц}}{S_x \cdot g} \cdot \left( \frac{v^2}{R} - \frac{h_p}{2 \cdot S_x} \cdot g \right) \right] + p_B \cdot S_{п} \cdot \frac{h_B}{2 \cdot S_x} - N \cdot \frac{L_c \cdot h_a}{S_x \cdot R} > 0 \quad (4.1)$$

$$R_A = \frac{Q}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{h_{ц}}{S_x \cdot g} \cdot \left( \frac{v^2}{R} - \frac{h_p}{2 \cdot S_x} \cdot g \right) \right] - p_B \cdot S_{п} \cdot \frac{h_B}{2 \cdot S_x} - N \cdot \frac{L_c \cdot h_a}{S_x \cdot R} > 0 \quad (4.2)$$

где  $Q$  – вес вагона;

$h_{\text{ц}}, h_{\text{в}}, h_{\text{а}}$  – высота над уровнем головок рельсов точек приложения сил;

$N$  – сила в межвагонной связи;

$2L_{\text{с}}$  – длина вагона по осям сцепления автосцепок;

$h_{\text{р}}$  – возвышения наружного рельса над внутренним;

$p_{\text{в}}$  – давление ветра;

$S_{\text{п}}$  – площадь боковой проекции вагона;

В качестве примера рассмотрим движение поезда, массой 1083 тонны, состоящего из 35 порожних крытых вагонов и одного электровоза серии O`ZELR (общее количество экипажей 36). Рассматривается по нечетному направлению движение грузового поезда по участку из станции Пап-2 (начало пути.) до станции Орзу (85 км.) (рисунок – 4), находящегося на железнодорожной пути Пап-2 – Ангрэн. Данный участок характеризуется сложным горным профилем пути с наличием кривых малого радиуса, создающих предпосылки к потере вагонами устойчивости. В специальном программном обеспечении вышеуказанными методами имитационного моделирования было выполнено исследование, полученные результаты приведены в рисунке 5. При выполнении расчётов учтено, что на боковую поверхность поезда во время движения оказывает влияние ветер, создающий избыточное давление 940 Па.

#### Анализ результатов расчётов.

Рассмотрено движение поезда с максимально допустимой по состоянию пути скоростью, для чего в модели реализован автоматический регулятор скорости, работающий в режиме стабилизации [5]. Для каждого экипажа на каждом шаге интегрирования по времени в программном обеспечении были определены:

- скорость, ускорение и пройденный путь каждого экипажа;
- координата каждого экипажа на участках с различными уклонами и кривыми;
- силы основного и дополнительного сопротивления движению каждого экипажа;
- силы в межвагонных связях;
- величины реакции наружного рельса для каждого экипажа.

На рисунке 5 а, б, с приведены графики зависимостей силы тяги  $F_{\text{к}}(S)$ , величины реакции наружного рельса 23-го вагона  $R_{\text{д}}(S)$ , вычисленная по формуле (4.2) и скорости  $v(S)$  соответственно. Как видно, величина силы тяги  $F_{\text{к}}(S)$  изменяется таким образом, чтобы обеспечить движение поезда с заданной скоростью при изменении величин основного и дополнительного сопротивлений движения. Кратковременные изменения сил тяги вызваны изменением величины заданной скорости и, как следствие, необходимостью обеспечить разгон до достижения заданной величины скорости.

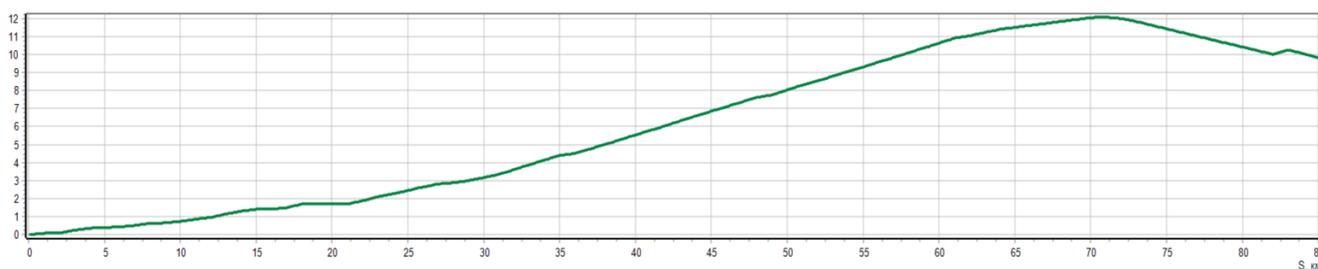
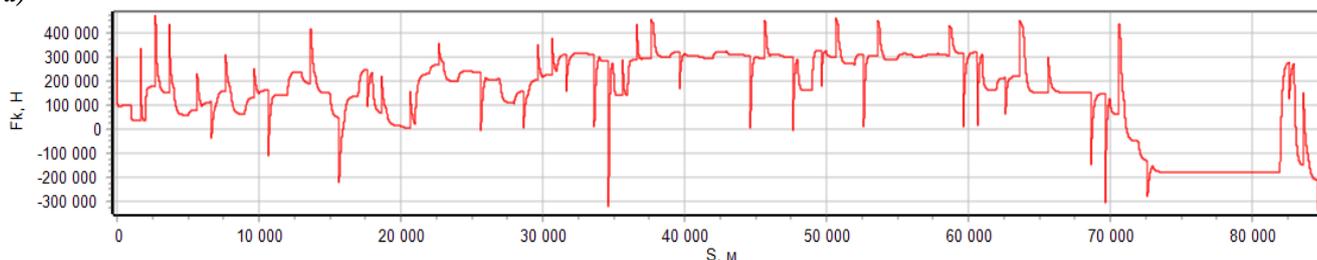
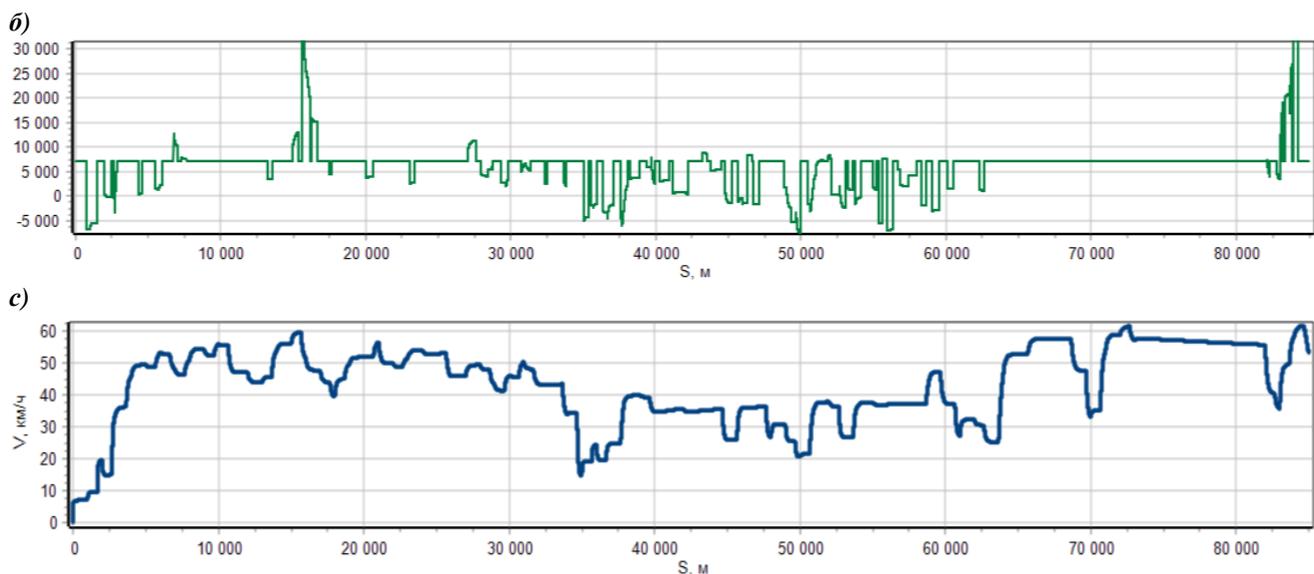


Рисунок – 4. Схема железнодорожной участки от станции Пап-2 до станции Орзу (0 – 85 км.)

а)





**Рисунок 5. Схемы соединенного поезда по схеме ЛС с 35 крытыми вагонами, с общим весом 1083 тонн, эпюры распределения силы тяги локомотива  $F_k$  (а), устойчивости вагона  $R_A$  (б) и скорости подвижного состава (в) к пути.**

Анализ результатов расчёта показал, что при движении поезда по прямому участку величина реакции определяется величиной осевой нагрузки вагона, а также опрокидывающим моментом, вызванным действующим ветром (например, на участке пути с 2000 м. до 2200 м.). При движении в кривом участке пути дополнительным влияющим фактором становится центробежная сила, действующая на вагон, в результате чего происходит разгрузка колеса, движущегося по наружному рельсу, что соответствует отрицательному значению величины реакции. (участки пути с 35100 м. до 35452 м., радиусом 1762 м., возвышением наружного рельса 38 мм.). Данная ситуация возникает как при разгоне поезда, когда реализуется наибольшее значение силы тяги (54000 м.), так и при движении с постоянной скоростью и постоянной силой тяги (56000 м.). Для предотвращения возникновения ситуаций, угрожающих безопасности движения поездов, целесообразно выполнять корректировку режимов движения, уменьшая скорость движения и избегая режимов разгона при нахождении поезда в кривой малого радиуса.

### **Заключение**

Для оценки продольных квазистатических растягивающих сил, возникающих во время движения поезда, а также оценки факторов, создающих угрозу безопасности движения поездов из-за угрозы схода вагонов с рельсов, в том числе при движении по горно – перевальному участку была разработана математическая модель, учитывающая параметры вагонов поезда, а также профиля и плана пути. Было разработано специализированное программное обеспечение, реализующее модель грузового поезда и горно – перевального участка Пап – Ангрэн. В результате выполненного исследования установлено, что опасность потери устойчивости вагонов в кривых участках пути малого радиуса возникает как при движении с установившейся скоростью, так и при разгоне поезда, причём в последнем случае опасность возрастает из-за значительно больших сил тяги, реализуемых локомотивом. Для обеспечения безопасности движения целесообразно ограничивать скорость движения в опасных участках, что позволит снизить величины продольных сил в поезде, а значит и снизить вероятность возникновения опасного с точки зрения безопасности движения сочетания нагрузок, ведущих к сходу вагона с рельсов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нестационарные режимы тяги (Тяговое обеспечение перевозочного процесса) / Лисицын А. Л., Мугинштейн Л. А. / Под ред. Г. И. Нарских, И. К. Петушковой. – Москва: Интекст, 1996. – 159 с.
2. 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.
3. Блохин, Е. П. Динамика поезда (нестационарные продольные колебания) / Е. П. Блохин, Л. А. Манашкин. — Москва: Транспорт, 1982. — 222 с.
4. Паристый, И. Л. Вождение поездов повышенной массы и длины / И. Л. Паристый, Р. Г. Черепашенец. – Москва: Транспорт, 1983. – 240 с.
5. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. — Спб.: Профессия, 2003. — 752 с.

## REFERENCES

1. Unsteady traction modes (Traction support of the transportation process) / Lisitsyn A. L., Muginstein L. A. / Edited by G. I. Narskikh, I. K. Petushkova. – Moscow: Intext, 1996. – 159 p.
2. Vershinsky, S. V. Dynamics of the carriage. Textbook for universities J.-D. transp. / S. V. Vershinsky, V. N. Danilov, V. D. Khusidov — Edited by S. V. Vershinsky. — 3rd ed., reprint. and additional — M.: Transport, 1991. — 360 p.
3. Blokhin, E. P. Train dynamics (unsteady longitudinal oscillations) / E. P. Blokhin, L. A. Manashkin. — Moscow: Transport, 1982. – 222 p.
4. Paristy, I. L. Driving trains of increased mass and length / I. L. Paristy, R. G. Cherepashenets. – Moscow: Transport, 1983. – 240 p.
5. Besekersky, V. A. Theory of automatic control systems / V. A. Besekersky, E. P. Popov. — St. Petersburg: Profession, 2003. — 752 p.

## Информация об авторах

*Пудовиков Олег Евгеньевич* – д-р. доцент, заведующий кафедры «Электропоезда и локомотивы», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, e-mail: olegper@mail.ru  
*Кахрамонов Шохрух Наримон угли* – аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, e-mail: qahramonovsh1995@gmail.com  
*Жухин Никита Олегович* – ассистент кафедры «Электропоезда и локомотивы», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, e-mail: rzd1997@mail.ru

## Information about the authors

*Pudovikov Oleg Evgenievich* – Doctor of Sciences in Engineering, Head of the department «Locomotives and multiple-unit trains», Moscow, Russian University of Transport (MIIT), e-mail: olegper@mail.ru  
*Kahramonov Shohruh Narimon ugli* – postgraduate student of the department «Locomotives and multiple-unit trains», Moscow, Russian University of Transport (MIIT), e-mail: qahramonovsh1995@gmail.com  
*Zhukhin Nikita Olegovich* – Assistant of the department «Locomotives and multiple-unit trains», Moscow, Russian University of Transport (MIIT), e-mail: rzd1997@mail.ru