

УДК 656.21.001.2

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/117/21>

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНА НА ПЕРВОМ СКОРОСТНОМ УЧАСТКЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОПУТНОГО ВЕТРА МАЛОЙ ВЕЛИЧИНЫ

©Ситников С. А., ORCID: 0000-0002-7653-6587, SPIN-код: 6830-4129,
канд. техн. наук, Уральский государственный университет путей сообщения,
г. Екатеринбург, Россия, SSitnikov@usurt.ru

THE RESEARCHING OF THE CAR'S MOVEMENT ON THE FIRST SPEED SECTION OF MARSHALLING HUMP UNDER THE INFLUENCE OF FAIR WIND OF SMALL SIZE

©Sitnikov S., ORCID: 0000-0002-7653-6587, SPIN-code: 6830-4129,
Ph.D., Ural State University of Railway Transport,
Yekaterinburg, Russia, SSitnikov@usurt.ru

Аннотация. Приведены силовые соотношения на первом скоростном участке горки. Вычислено ускорение вагона при равноускоренном движении. Изложены уточнённые результаты вычислений времени движения и скорости вагона на первом скоростном участке горки при воздействии проекции попутного ветра малой величины на торцевую сторону вагона с учётом только сопротивления среды и проекции попутного ветра с боковой стороны вагона.

Abstract. The article describes the power ratio at the first speed section of the slides. Calculated the acceleration of the car with uniformly accelerated movement. Set out the revised calculation results of time motion and speed of the car on the first speed section under the influence of the projection of the fair wind a small size on the side of the car with the resistance and the projection of a fair wind from the side of the car.

Ключевые слова: железная дорога, станция, движение вагона.

Keywords: railway, station, movement of a carriage.

Результаты исследований Х. Т. Туранова из-за неверного представления диаграммы скорости попутного ветра и скорости движения вагона по уклону сортировочной горки, к сожалению, содержат некоторые неточности [1, 2]. Кроме того, сопротивления всякого рода (среды, стрелки, кривых, снега и инея) по существу учтены при движении вагона на всей длине первого скоростного участка горки (в дальнейшем – СК1 горки), предполагая наличие на этом участке горки стрелочного перевода. В связи с этим, в данной работе будет исследовано движение вагона на участке СК1 горки при воздействии попутного ветра с учётом только сопротивления среды и проекции попутного ветра на боковую сторону вагона.

На основе силовых соотношений, действующих на систему «вагон-путь» с учётом проекции попутного ветра малой величины на торцевую сторону вагона и сопротивления среды $F_{\text{ср.}}$, а также проекции попутного ветра с боковой стороны вагона $F_{\text{гву}} = F_{\text{тр.б.}}$, определить ускорение вагона при его равноускоренном движении. Далее с использованием формул пути и скорости движения тела, известных из курса физики, определить время и скорость скатывания вагона на участке СК1 горки. Необходимо получить конкретный

пример расчёта время движения и скорости скатывания вагона на участке СК1 горки по упрощённой методике, где по известной величине этого участка горки $l_1 = x(t_k)$ можно было бы найти время t_k , в течение которого вагон движется с заданной начальной скоростью v_{01} , а по величине времени t_k – скорость вагона $v_{ek}(t_k)$. Здесь и далее $k = 1$ соответствует воздействию только сопротивления среды ($F_c = F_{cp.}$) и $k = 11$ – одновременному воздействию сопротивления среды $F_{cp.}$ и ветра с боковой стороны вагона $F_{тр.б}$ на участке СК1 горки. Общий подход к решению задачи, аналогично [1, 2, 5], заключается в следующем.

1. В условиях задачи и принятых предпосылках рассмотрен случай, когда вагон по уклону сортировочной горки входит на участок СК1 горки с заданной начальной скоростью (скорость надвига вагона на участок СК1 горки) v_{01} . При входе одиночного вагона на рассматриваемый участок горки, считаем, что вагон будет испытывать воздействие в основном внешних сил в виде силы тяжести вагона с грузом G , проекции силы аэродинамического сопротивления попутного ветра малой величины $F_{гв}$ по продольной оси Ox и поперечной оси Oy в виде $F_{гвх}$ и $F_{гвы}$, имея в виду, что оси Ox и Oy ортогональны в плоскости движения вагона.

2. При формировании расчётной модели движения вагона на участке СК1 горки принято предположение о том, что колёсные пары движутся относительно рельсовых нитей при чистом качении колёс $F_{тр.к}$ и трении скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити $F_{тр.ск}$, которое появляется при воздействии ветра с боковой стороны вагона $F_{гвы}$, т. е. $F_{тр.х} = F_{\tau} = F_{тр.к} + F_{тр.ск}$. Учитывая это, упрощённая расчётная модель движения вагона на участке СК1 горки, полученная с использованием принципа освобождения от связей (рельсовых нитей) классической механики, представлена на Рисунке.

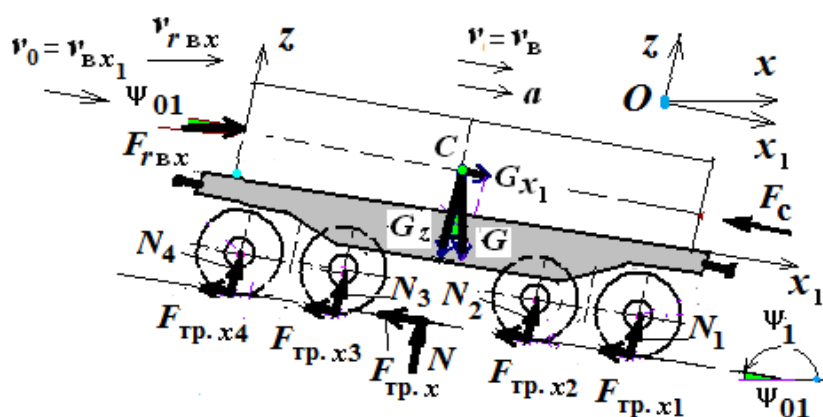


Рисунок. Упрощённая расчётная модель движения вагона на участке СК1 горки при воздействии попутного ветра

На Рисунке обозначено: O – начало подвижной системы координат Ox_1yz , жёстко связанной с вагоном; Ox – ось по горизонтали; ψ_{01} – угол уклона (спуска) участка СК1 горки; $v_{гвх}$ – относительная скорость воздуха; $v_0 = v_{вх1}$ – начальная скорость вагона; $v_в$ – скорость вагона; G и G_{x1} , G_z – сила тяжести вагона с грузом и её проекции на оси Ox_1 и Oz ; $F_c = F_{cp.}$ – сила сопротивления среды; N и $F_{тр.х}$ – нормальная и касательная составляющие реакции связей (рельсовых нитей). Причём $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ и $F_{тр.х} = F_{тр.х1} + F_{тр.х2} + F_{тр.х3} + F_{тр.х4}$, как параллельные силы.

3. Упрощённый метод построения математической модели движения вагона на участке СК1 горки базируется на основном законе динамики для переносного движения вагона с неидеальной связью (или принцип Даламбера) в координатной форме [9], на основе которого

найден ускорение вагона при скатывании с горки, и на широко известные из курса физики формулы скорости и пути при равноускоренном движении тела. Таким образом, с использованием основного принципа Даламбера и классических формул пути и скорости тела физики по известной величине участка СК1 горки $l_1 = x(t_k)$ определено время t_k , в течение которого происходит движение вагона с заданной начальной скоростью v_{01} , а по величине времени t_k – скорость вагона $v_{ek}(t_k)$.

Упрощённый подход к расчёту времени движения и скорости вагона на участке СК1 горки при воздействии проекции попутного ветра, выполняют в следующей последовательности.

1. Будет исследован случай проектирования горочной горловины на 24 пути и горку повышенной и большой мощности, поскольку в программе расчёта и проектирования горки, разработанная нами, начальная скорость (скорость надвига) вагона, принята, равной 1,7 м/с. Например, если уклон горки 50 промилле, $\psi_{01} = 0,05$ рад. = $2,865^\circ$ ($\text{tg}\psi_{01} = 0,05$), то длина рассматриваемого участка горки $l_1 \approx 39,95$ м.

2. Рассчитывают «сдвигающую» силу $F_{\text{сд.х1}}$ (т. е. проекцию силы тяжести вагона с грузом $G_{\text{х1}}$ и силы сопротивления попутного ветра $F_{\text{рв.х}}$ на направление скатывания вагона по оси Ox_1 (Рисунок):

$$F_{\text{сд.х1}} = G \sin(\psi_{0k}) + F_{\text{рвх}} \cos(\psi_{0k}), \quad (1)$$

где G – сила тяжести вагона с грузом с учётом инерции вращающихся масс, кН.

Например, если $G = 908$ кН (без учёта этой инерции $G = 794$ кН при силе тяжести груза $G_{\text{гр}} = 650$ кН); $\sin(\psi_{01}) = 0,05$, $F_{\text{рв.х}} = 3,192$ кН [5], $\cos(\psi_{01}) = 0,999$, то $F_{\text{сд.х1}} = 48,569$ кН.

3. Вычисляют силу трения качения $F_{\text{тр.к}}$ от проекции силы тяжести вагона с грузом G_z и силы сопротивления попутного ветра $F_{\text{рв.х}}$ на ось Oz (см. рис. 1), как касательную составляющую реакции связи (рельсовых нитей) F_τ , которая согласно закону Кулона равна:

$$F_{\text{тр.к}} = f_0 (G \cos(\psi_{0k}) + F_{\text{рвх}} \sin(\psi_{0k})); \quad (2)$$

где f_0 – некоторый приведённый коэффициент трения качения, учитывающий количество колёс в тележках, трения качения (по кольцам подшипника и колесо по рельсу) (обычно принимают $f_0 = 0,0001$) [1-6]. Например, если $f_0 = 0,0001$, $G = 908$ кН – сила тяжести вагона с грузом с учётом инерции вращающихся масс (без учёта этой инерции $G = 794$ кН при силе тяжести груза $G_{\text{гр}} = 650$ кН), $\cos(\psi_{01}) = 0,999$, $F_{\text{рв.х}} = 3,192$ кН, $\sin(\psi_{01}) = 0,05$, то $F_{\text{тр.х1}} = F_{\text{тр.к}} = 0,094$ кН.

4. Вычисляют силу трения скольжения $F_{\text{тр.ск}}$ от воздействия ветра с боковой стороны вагона $F_{\text{рву}} = F_{\text{рв.б}}$, как касательную составляющую реакции связи (рельсовых нитей) F_τ , которая согласно закону Кулона равна:

$$F_{\text{трб.х}} = F_{\text{тр.ск}} = f_{\text{ск0}} F_{\text{рву}} = f_{\text{ск0}} F_{\text{рвб}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{ск0}}$ – коэффициент трения скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити (обычно принимают $f_{\text{ск0}} = 0,25$). Например, если $f_{\text{ск0}} = 0,25$, $F_{\text{рв.у}} = F_{\text{рв.б}} = 13,68$ кН [5], то $F_{\text{трб.х}} = F_{\text{тр.ск}} = 3,42$ кН.

5. С учётом (2) и (3), вычисляют силу трения вдоль движения вагона как сумму сил трения качения $F_{\text{тр.к}}$ и сил трения скольжения $F_{\text{тр.ск}}$ с учётом воздействия ветра с боковой стороны вагона $F_{\text{рв.у}}$ в виде:

$$F_{\text{тр.х1}} = F_\tau = F_{\text{тр.к}} + F_{\text{тр.ск}}. \quad (4)$$

Например, если $F_{тр.к} = 0,094$, $F_{тр.ск} = 3,42$ кН, то $F_{тр.х1} = 3,514$ кН.

6. Находят силы сопротивления движению вагона от среды $F_{ср.}$ в виде:

$$F_{ср.} = k_{ср.} G, \quad (5)$$

где $k_{ср.}$ – коэффициент, учитывающий долю силы тяжести G при учёте сопротивления среды (обычно в пределах $0,0001 \div 0,0005$ при скорости попутного ветра от 2 до 4 м/с) [1, 2]. Например, если $k_{ср.} = 0,00044$ и $G = 908$ кН, то $F_{ср.} = 0,395$ кН.

7. Вычисляют «удерживающие» силы $F_{удк.х1}$, оказывающие сопротивление движению вагона на участке СК1 горки в виде:

$$F_{удк.х1} = F_{тр.к} + F_{ср.} + F_{тр.ск}, \quad (6)$$

или

$$F_{удк.х1} = f_0(G \cos(\psi_{0k}) + F_{рвх} \sin(\psi_{0k})) + k_{ср.} G + f_{ск0} F_{рвб}. \quad (7)$$

Здесь $k = 1$ соответствует учёту только сопротивления среды $F_{ср.}$ и $k = 11$ – учёту одновременного воздействия сопротивления среды $F_{ср.}$ и ветра с боковой стороны вагона $F_{тр.б.}$. Например, при вычислении $F_{удк.х1}$ по (7): если $F_{тр.к} = 0,094$ кН (по (2)), $F_{ср.} = 0,395$ кН, то с учётом воздействия только сопротивления среды $F_{ср.}$, $F_{уд1.х1} = 0,489$ кН, а с учётом одновременного воздействия сопротивления среды $F_{ср.}$ и проекции ветра с боковой стороны вагона $F_{рв.у} = F_{рв.б}$: $F_{рв.у} = 13,68$ кН, $F_{тр.б.х} = F_{тр.б.к} = 3,42$ кН (по (4)), $F_{уд11.х1} = 3,909$ кН.

8. По величинам «сдвигающей» $F_{сд.х1}$ и «удерживающей» $F_{удк.х1}$ сил вычисляют силу F_k , способствующую движению вагона на участке СК1 горки, кН:

$$F_k = F_{сд.х1} - F_{удк.х1}. \quad (8)$$

Например, если $F_{сд.х1} = 48,569$ кН; $F_{уд2.х1} = 0,489$ кН, то $F_1 = 48,08$ кН – сила, при воздействии которой происходит движение вагона с ускорением на участке СК1 горки при воздействии сопротивления среды $F_{ср.}$, а при одновременном учёте сопротивления среды $F_{ср.}$ и ветра с боковой стороны вагона $F_{рв.б} - F_{уд11.х1} = 3,909$ кН, то $F_{11} = 44,66$ кН.

9. По значению силы F_k и массы вагона M с учётом инерции вращающихся частей (колёсных пар) находят ускорение вагона a_k при движении на рассматриваемом участке горки с ускорением, м/с²:

$$a_k = \frac{F_k 10^3}{M}. \quad (9)$$

Например, если $M = 9,256 \cdot 10^4$ кг – масса вагона с грузом с учётом инерции вращающихся частей вагона и $F_1 = 48,08$ кН, то ускорение вагона, при котором происходит ускоренное движение при учёте только сопротивления среды $F_{ср.}$, $a_1 = 0,519$ м/с² (если учесть одновременное воздействие сопротивления среды $F_{ср.}$ и ветра с боковой стороны вагона $F_{рв.б.}$, то при $F_{11} = 44,66$ кН – $a_{11} = 0,483$ м/с²).

10. Вычисляют время t_k в с, в течение которого происходит прямолинейное равноускоренное движение вагона на участке СК1 горки длиной l_1 , $t_k = f(v_{0k}, a_k, l_j)$ (см. (16) [8]), где v_{01} – начальная скорость вагона (скорость надвига вагона на участок СК1 горки), м/с. для неблагоприятных условий скатывания для горок большой и повышенной мощности, $v_{01} = 1,7$ м/с.

Например, если $v_{01} = 1,47$ м/с, $a_1 = 0,519$ м/с², $l_1 = 39,95$ м, то время, в течение которого происходит скатывание вагона на участке СК1 горки при воздействии сопротивления среды $F_{\text{ср.}}$ – $t_1 = 9,554$ с, при учёте одновременного воздействия сопротивления среды $F_{\text{ср.}}$ и ветра с боковой стороны вагона $F_{\text{гв.б}}$ (т. е. $v_{01} = 1,7$ м/с и $a_{11} = 0,483$ м/с²) – $t_{11} = 9,819$ с. При необходимости можно построить графическую зависимость $t_k = f(l_1)$.

11. Определяют скорость вагона на участке СК1 горки $v_{ek}(t)$ по классической формуле физики – $v_k = f(v_{0k}, a_k, t_k)$ (см. (13) [8]), м/с. Например, для заданных исходных данных: $v_{01} = 1,7$ м/с, $a_1 = 0,519$ м/с², $t_1 = 9,554$ с скорость вагона на участке СК1 горки при воздействии сопротивления среды $F_{\text{ср.}}$ – $v(t_1) = 6,663$ м/с или 24,0 км/ч, а с учётом воздействия сопротивления среды $F_{\text{ср.}}$ и ветра с боковой стороны вагона $F_{\text{гв.б}}$ ($v_{01} = 1,7$ м/с, $a_{11} = 0,483$ м/с², $t_{11} = 9,819$ с) $v(t_{11}) = 6,438$ м/с или 23,2 км/ч.

При необходимости строят графическую зависимость $v_{ek}(l_1) = f(l_1)$, как часть зависимости, характеризующей изменения скорости скатывания вагона по всей длине сортировочной горки.

Обобщая результаты исследований на примере воздействия проекции попутного ветра на торцевую сторону вагона с учётом воздействия только сопротивлений среды $F_{\text{ср.}}$, можно отметить, что если время движения вагона, например, при $k = 1$: $t_1 = 9,954$ с, то его скорость $v(t_1) = 6,63$ м/с или 24,0 км/ч, а при учёте одновременного воздействия сопротивлений среды $F_{\text{ср.}}$ и проекции ветра с боковой стороны вагона $F_{\text{гв.б}}$ при $k = 11$: $t_{11} = 9,819$ с и его скорость $v(t_{11}) = 6,438$ м/с или 23,2 км/ч.

Выводы

1. Силовые соотношения, которые имеют место в системе «вагон-путь» на участке СК1 горки при воздействии проекции попутного ветра малой величины с учётом только сопротивления среды и проекции ветра с боковой стороны вагона, позволили определить величину ускорения вагона при его движении по уклону горки.

2. Результаты расчетов времени движения и скорости скатывания вагона по упрощённой методике позволили по вычисленной величине ускорения вагона a_k и известному значению пройденного расстояния вагона l_1 на участке СК1 горки определить время движения вагона t_k при различных условиях (воздействие только сопротивления среды и ветра с боковой стороны вагона). По величине t_k определена скорость скатывания вагона в конце рассматриваемого участка горки $v_k(t_k)$.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы для уточнённого расчета параметров сортировочной горки.

Список литературы:

1. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Математическая модель времени скатывания вагона на первом скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины // Бюллетень транспортной информации. 2015. № 6 (240). С. 17-23.
2. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Новая методика расчёта времени и скорости скатывания вагона на первом скоростном участке сортировочной горки // Бюллетень транспортной информации. 2015. №8(242). С. 37-43.
3. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Аналитическое определение времени скатывания вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины // Наука и техника транспорта. 2015. №2. С. 73-81.

4. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Определение времени и скорости скатывания вагона перед первой горочной тормозной позицией сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. № 7. С. 25-30.

5. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Пример расчёта времени и скорости скатывания вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины по новой методике // Наука и техника транспорта. 2015. №3. С. 63-70.

6. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Пример расчёта времени и скорости скатывания вагона перед первой тормозной позицией сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины по новой методике // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. №9. С. 15-19.

7. Turanov K., Gordienko A. Analytical Determination of Conditions of Wagon Rolling Down Marshalling Hump Profiles // Open Access Library Journal. 2015. V. 2. №10. P. 1-11. <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101912>

8. Khabibulla T., Andrey G., Alena M. Analytical Description of Wagon Motion on the Second Speed Section of the Marshalling Hump with Switch Zone under the Impact of Fair Wind // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST). 2015. V. 2. №11.

9. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики. Т. II. Динамика. М.: Наука, 1983. 640 с.

References:

1. Turanov, Kh. T., & Gordienko, A. A. (2015). Matematicheskaya model' vremeni skatyvaniya vagona na pervom skorostnom uchastke sortirovochnoi gorki pri vozdeistvii poputnogo vetra maloi velichiny. *Byulleten' transportnoi informatsii*, (6 (240)), 17-23. (in Russian).

2. Turanov, Kh. T., & Gordienko, A. A. (2015). Novaya metodika rascheta vremeni i skorosti skatyvaniya vagona na pervom skorostnom uchastke sortirovochnoi gorki. *Byulleten' transportnoi informatsii*, (8(242)), 37-43. (in Russian).

3. Turanov, Kh. T., & Gordienko, A. A. (2015). Analiticheskoe opredelenie vremeni skatyvaniya vagona na vtorom skorostnom uchastke sortirovochnoi gorki pri vozdeistvii poputnogo vetra maloi velichiny. *Nauka i tekhnika transporta*, (2), 73-81. (in Russian).

4. Turanov, Kh. T., & Gordienko, A. A. (2015). Opredelenie vremeni i skorosti skatyvaniya vagona pered pervoi gorochnoi tormoznoi pozitsiei sortirovochnoi gorki pri vozdeistvii poputnogo vetra maloi velichiny. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, (7), 25-30. (in Russian).

5. Turanov, Kh. T., & Gordienko, A. A. (2015). Primer rascheta vremeni i skorosti skatyvaniya vagona na vtorom skorostnom uchastke sortirovochnoi gorki pri vozdeistvii poputnogo vetra maloi velichiny po novoi metodike. *Nauka i tekhnika transporta*, (3), 63-70. (in Russian).

6. Turanov, Kh. T., & Gordienko, A. A. (2015). Primer rascheta vremeni i skorosti skatyvaniya vagona pered pervoi tormoznoi pozitsiei sortirovochnoi gorki pri vozdeistvii poputnogo vetra maloi velichiny po novoi metodike. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, (9), 15-19. (in Russian).

7. Turanov, K., & Gordienko, A. (2015). Analytical Determination of Conditions of Wagon Rolling Down Marshalling Hump Profiles. *Open Access Library Journal*, 2(10), 1-11. <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101912>

8. Khabibulla, T., Andrey, G., & Alena, M. (2015). Analytical Description of Wagon Motion on the Second Speed Section of the Marshalling Hump with Switch Zone under the Impact of Fair Wind. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 2(11).

9. Loitsyanskii, L. G., & Lur'e, A. I. (1983). *Kurs teoreticheskoi mekhaniki*. II. Moscow. (in Russian).

*Работа поступила
в редакцию 26.05.2025 г.*

*Принята к публикации
07.06.2025 г.*

Ссылка для цитирования:

Ситников С. А. Анализ движения вагона на первом скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины // Бюллетень науки и практики. 2025. Т. 11. №8. С. 155-161. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/117/21>

Cite as (APA):

Sitnikov, S. (2025). The Researching of the Car's Movement on the First Speed Section of Marshalling Hump under the Influence of Fair wind of Small Size. *Bulletin of Science and Practice*, 11(8), 155-161. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/117/21>