

Расчёт времени движения и скорости вагона на промежуточном участке сортировочной горки при попутном ветре



Хабибулла ТУРАНОВ
Khabibulla T. TURANOV

Андрей ГОРДИЕНКО
Andrey A. GORDIENKO



*Туранов Хабибулла Туранович – доктор технических наук, профессор Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия.
Гордиенко Андрей Александрович – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» УрГУПС, Екатеринбург, Росси.*

Calculation of Time of Movement and Speed of a Car on the Intermediate Section of the Hump Yard under Tail Wind

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 86)

Динамика скатывания вагона с сортировочной горки на железнодорожной станции изучается в разных ее аспектах. В том числе этой теме неоднократно касались и авторы (см., в частности, «МТ», 2015, № 6). Однако в ранее сделанных расчетах не доставало оценок времени движения и скорости вагона на промежуточном участке горки при воздействии попутного ветра малой величины. Публикуемая статья восполняет этот пробел, знакомит с результатами вычислений, математическими и графическими зависимостями, позволяющими сделать определенные обобщения и выводы.

Ключевые слова: принцип Даламбера, классические формулы пути и скорости тел, железнодорожная станция, сортировочная горка, промежуточный участок, попутный ветер, время и скорость скатывания вагона.

Результаты аналитических исследований движения вагона по уклону сортировочной горки, когда сила аэродинамического сопротивления $\bar{F}_{\text{гв}}$ попутного ветра зависит от квадрата скорости, т.е. $\bar{F}_{\text{гв}} = f(\bar{v}_{\text{гв}}^2)$ (где $\bar{v}_{\text{гв}}$ – относительная скорость ветра по отношению к вагону), изложены в [1–5]. При этом в [3–5] приведены данные вычислительных экспериментов с построением графических зависимостей скорости скатывания вагона от уклона горки. Однако аналитические формулы для определения скорости вагона при его движении по уклону сложны для практического использования. Именно потому в [6–16] исследованы случаи, когда сила аэродинамического сопротивления $\bar{F}_{\text{гв}}$ попутного ветра малой величины (например, при попутном ветре 2–4 м/с) линейно зависит от наветренной площади вагона с грузом, $F_{\text{гв}} = f(A_{\text{нав}})$. Такой подход широко применяется в задачах крепления грузов на вагонах [17], в которых принято, что удельное давление, приходящееся на 1 м² площади вагона с грузом, равно 0,5 кН/м².

В [6–8] сделаны попытки построения упрощённой математической модели движения вагона на скоростных участках горки и первой тормозной позиции при воздействии попутного ветра малой величины, но в них допущены некоторые неточности при представлении диаграммы скорости попутного ветра и скорости движения вагона по уклону. Эти неточности, по сути, не повлияли на результаты вычислений времени движения и скорости скатывания вагона, изложенные в [9, 10], что связано с незначительным углом уклона горки ψ_0 , поскольку $\cos\psi_0 \approx 1$ [11].

В [12] показаны силовые соотношения, возникающие в системе «вагон–путь», они рассмотрены отдельно для участка горки до и после стрелочного перевода. В [13–15] исследовано движение вагона на участке первой тормозной позиции с затормаживанием при воздействии попутного ветра малой величины. При этом решена задача определения скорости вагона и его тормозного пути в зависимости от времени торможения, в том числе до остановки вагона.

Несмотря на значительное количество работ по изучению динамики скатывания вагона с горки, до сих пор отсутствуют примеры расчёта времени движения и скорости скатывания вагона на промежуточном участке (далее – ПР участке) сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины. Данная статья призвана сделать реальный шаг в этом направлении.

ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

В нашем случае движение вагона на ПР участке горки при попутном ветре, согласно [16], разделено на два этапа: на первом вагон движется до стрелочного перевода, на втором – после стрелки по кривому участку.

Требуется получить пример расчёта времени и скорости вагона по упрощённой методике, где по известной величине ПР участка горки $l_j = x(t_k)$ можно было бы найти время t_k , в течение которого происходит движение с заданной начальной скоростью до и после стрелочного перевода, а по величине времени – скорость вагона $v_{ek}(t_k)$. Здесь и далее, согласно [12], $k = 4$ соответствует учёту только сопротивления среды F_{cp} на ПР участке горки до стрелки

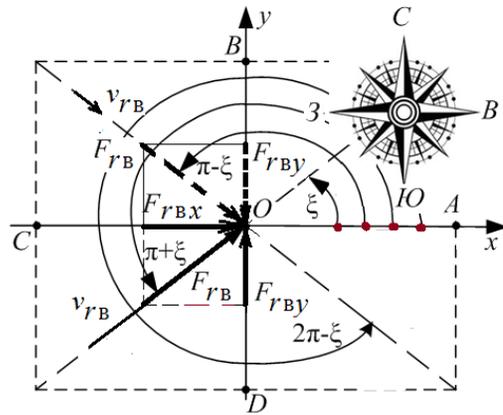


Рис. 1. Диаграмма попутного ветра юго-восточного или северо-восточного направлений.

и $k = 41$ – учёту воздействия сопротивления среды F_{cp} и проекции ветра на боковую сторону вагона F_{rvy} ; $k = 4$ с – учёту воздействия сопротивлений всякого рода (среды, стрелки, кривых, снега и инея) F_c на ПР горки после стрелки, $k = 41$ с – учёту воздействия сопротивлений всякого рода F_c и проекции ветра на боковую сторону вагона F_{rvy} и $k = 42$ с – одновременному учёту воздействия сопротивлений всякого рода F_c , поперечной переносной силы инерции I_{ey} и проекции ветра на боковую сторону вагона F_{rvy} (воздействия различных сопротивлений при движении вагона по кривому участку пути). Здесь и далее $j = 4$ соответствует случаю, когда $k = 4, 41, 42$, а $j = 4$ с – когда $k = 4, 41, 42$ с.

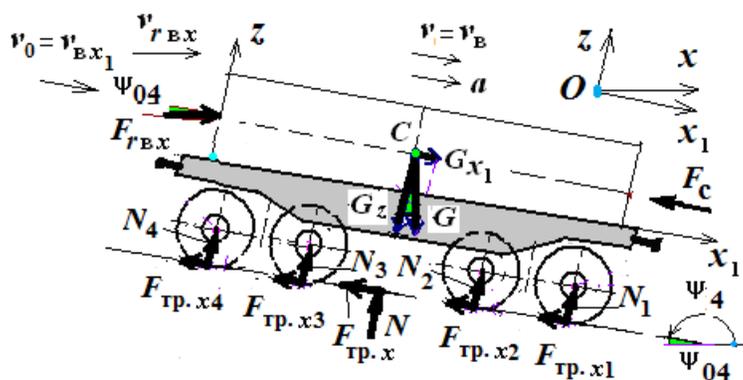
Общие подходы к решению задачи [12, 16] заключаются в следующем.

1. При рассмотрении движения вагона с сортировочной горки используются основной принцип Даламбера в координатной форме [23] и классические формулы скорости и пути из курса физики.

2. В условиях задачи и принятых предположениях фигурирует случай, когда вагон по уклону сортировочной горки входит на ПР участок с заданной начальной скоростью v_{ok} . При входе одиночного вагона считаем, что он преимущественно будет испытывать воздействие внешних сил в виде собственной тяжести с грузом G , проекции силы аэродинамического сопротивления попутного ветра малой величины F_{rv} (например, юго-восточного или северо-восточного направлений) по продольной оси Ox и поперечной оси Oy



Рис. 2. Упрощённая расчётная модель движения вагона по профилю ПР участка горки при воздействии попутного ветра.



в виде F_{rvx} и F_{rvy} , т.е. $\bar{F}_{rvx}, \bar{F}_{rvy} \in \bar{F}_{rv}$) (рис. 1), имея в виду, что в ней проекции силы аэродинамического сопротивления приняты зависящими только от площади наветренной поверхности вагона с грузом, как это бывает при решении задачи крепления грузов на вагонах [7].

На рис. 1 обозначено: \bar{v}_{rv} – абсолютная скорость попутного ветра; $\varpi + \xi$ – направляющий угол вектора абсолютной скорости ветра \bar{v}_{rv} относительно горизонтали (ось Ox) для юго-западного направления; \bar{F}_{rv} – сила воздействия попутного ветра; $F_{rv,x}$ и $F_{rv,y}$ – проекции силы воздействия \bar{F}_{rv} попутного ветра на Ox и Oy , т.е. $(\bar{F}_{rv,x}, \bar{F}_{rv,y}) \in \bar{F}_{rv}$. Заметим, что если ветер северо-восточного направления, то сила F_{rvy} имеет противоположное направление.

3. При формировании расчётной модели движения вагона на ПР участке горки до стрелки принято предположение, что колёсные пары по рельсовым нитям движутся при чистом качении колёс относительно поверхности катания рельсовых нитей $F_{тр,к}$ и трения скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити $F_{тр,ск}$ при учёте воздействия проекции ветра на боковую сторону вагона F_{rvy} , т.е. $F_{тр,x} = F_{\tau} = F_{тр,к} + F_{тр,ск}$. При движении вагона по кривому участку пути после стрелки кроме сопротивлений всякого рода F_c следует учесть ещё воздействие поперечной переносной силы инерции I_{cy} и проекции силы F_{rvy} на направления последней силы.

В соответствии с этим упрощённая расчётная модель движения вагона на ПР участке горки представлена на рис. 2, где

O – начала подвижной системы координат Ox,y,z , жёстко связанной с вагоном; Ox – ось по горизонтали; ψ_{04} – угол уклона (спуска) ПР участка горки; v_{rvx} – относительная скорость воздуха; $v_0 = v_{vx1}$ – начальная скорость вагона; v_v – скорость вагона; $F_c = F_{cp}$ – сила сопротивления среды до стрелки, а после стрелки F_c – сила сопротивления всякого рода; N и $F_{тр,x}$ – нормальная и касательная составляющие реакции связей (рельсовых нитей). Причём $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ и $F_{тр,x} = F_{тр,x1} + F_{тр,x2} + F_{тр,x3} + F_{тр,x4}$ выступают как параллельные силы.

Таким образом, с использованием основного принципа Даламбера и классических формул пути и скорости тела по известной величине ПР горки $l_k = x(t_k)$ и в согласии с [16] определены время t_k , в течение которого вагон движется с заданной начальной скоростью v_{0k} до начала стрелочного перевода, а по величине времени t_k – скорость вагона $v_{ek}(t_k)$. Аналогично находятся время движения t_{kc} и скорость вагона $v_{ekc}(t_{kc})$ после стрелки до начала второй тормозной позиции.

УПРОЩЁННАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЙ

Отметим, что представленные ниже формулы выведены нами ранее [12]. Оригинальными же результатами являются вычисленные величины сил, способствующие и/или препятствующие движению вагона на ПР участке горки, а также значения ускорений, времени движения и скорости скатывания вагона. Упрощённую последовательность расчёта скорости вагона на ПР участке до и после стрелочного перевода при воздействии попутного ветра аналогично [12, 16] можно представить следующим образом.

1. Рассмотрим случай проектирования горочной горловины на 24 пути. При проектировании сортировочной горки полную длину ПР участка l_k принимают согласно рекомендациям [24]. Например, уклон горки 9 промилле, $\psi_{04} = 0,009$ рад. ($\sin(\psi_{04}) = 0,009$), длина участка до стрелки $l_4 = 20,001$ м, а после стрелки $l_{4c} = 21,271$ м.

2. Рассчитывают проекции силы воздействия попутного ветра на вагон, например, юго-западного направления, по продольной Ox и поперечной Oy_1 оси (на рис. 2 ось Oy_1 не показана) в виде (2) [12], кН:

$$F_{рвх} = 0,5A F_{рвб} = 0,5A_6, \quad (1)$$

где $0,5$ – удельное давление на 1 м^2 площади, кН/м² [17]; A_t – площадь торцевой поверхности вагона с грузом, м²; A_6 – площадь боковой поверхности вагона с грузом, м². Допустим, если $A_t = 6,384$ и $A_6 = 27,36$ м², то $F_{рвх} = 3,192$ и $F_{рвy} = 13,68$ кН.

3. Рассчитывают «сдвигающую» силу $F_{сд.х1}$ (т.е. проекцию силы тяжести вагона с грузом G_{x1} и силы воздействия попутного ветра $F_{рвх}$ на направление скатывания вагона по оси Ox_1) – см. рис. 2 и (3) [12]:

$$F_{сд.х1} = G \sin(\psi_{0k}) + F_{рвх} \cos(\psi_{0k}), \quad (2)$$

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

Например, если $G = 908$ кН, $\sin(\psi_{04}) = 0,009$, $F_{рвх} = 3,192$ кН, $\cos(\psi_{04}) = 1$, то $F_{сд.х1} = 11,364$ кН.

4. Определяют силу трения качения $F_{тр.к}$ в зависимости от проекции силы тяжести вагона с грузом G_z и силы сопротивления попутного ветра $F_{рвх}$ на направление оси Oz (см. рис. 2) как касательную составляющую реакции связи (рельсовых нитей) F_r , которая согласно закону Кулона равна (см. (7) [12]):

$$F_{тр.к} = f_0 (G \cos(\psi_{04}) + F_{рвх} \sin(\psi_{04})), \quad (3)$$

где f_0 – некоторый приведённый коэффициент трения качения, учитывающий количество колёс в тележках, трение качения (по кольцам подшипника и колеса по рельсу) (обычно принимают $f_0 = 0,0001$) [1–5].

Допустим, если $f_0 = 0,0001$, $G = 908$ кН – сила тяжести вагона с грузом с учётом инерции вращающихся масс (колёсных пар) (без учёта этой инерции $G = 794$ кН при силе тяжести груза $G_{гр} = 650$ кН), $\cos(\psi_{04}) = 1$, $F_{рвх} = 3,192$ кН, $\sin(\psi_{04}) = 0,009$, то $F_{тр.к} = F_{тр.к} = 0,094$ кН.

5. Находят силу трения скольжения $F_{тр.ск}$ от воздействия проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{рвy} = F_{рв.б}$ с учётом данной силы как касательную составляющую реакции связи (рельсовых нитей) F_r , которую согласно закону Кулона определяют из выражения (106 [12]):

$$F_{тр.б.х} = F_{тр.ск} = f_{ск0} F_{рвy} = f_{ск0} F_{рбy}, \quad (4)$$

где $f_{ск0}$ – коэффициент трения скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити (обычно принимают до $f_{ск0} = 0,25$) [12–14]. Например, если $f_{ск0} = 0,2$, $F_{рв.б} = F_{рбy} = 13,68$ кН, то $F_{тр.б.х} = F_{тр.ск} = 2,736$ кН.

6. На основе (3) и (4) вычисляют силу трения вдоль движения вагона как сумму сил трения качения $F_{тр.к}$ и сил трения скольжения $F_{тр.ск}$ с учётом воздействия проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{рвy}$ в виде

$$F_{тр.х1} = F_r = F_{тр.к} + F_{тр.ск}. \quad (5)$$

К примеру, если $F_{рв.б} = 0,094$, $F_{тр.к} = 2,736$ кН, то $F_{тр.х1} = 2,954$ кН.

7. Определяют силы сопротивления движению вагона от среды $F_{сп.}$ в виде (106) [12]:

$$F_{сп.} = k_{сп.} k_{нв.} G, \quad (6)$$

где $k_{сп.}$ – коэффициент, учитывающий долю силы тяжести G при учёте сопротивления среды (обычно в пределах $0,0001$ – $0,0005$ при скорости попутного ветра от 2 до 4 м/с) [25, с. 182]; $k_{нв.}$ – коэффициент, учитывающий неточность вычислений $k_{сп.}$ (обычно принимают до 1). Скажем, если $k_{сп.} = 0,0003$, $k_{нв.} = 0,8$ и $G = 908$ кН, то $F_{сп.} = 0,218$ кН.

8. Вычисляют «удерживающие» силы $F_{удк.х1}$, оказывающие сопротивление движению вагона на ПР участке горки до и после стрелочного перевода в виде (см. (12) [16]):

$$F_{удк.х1} = F_{тр.к} + F_{сп.} + F_{тр.ск}; \quad (7)$$

$$F_{удк.х1} = f_0 (G \cos(\psi_{04}) + F_{рвх} \sin(\psi_{04})) + (k_{сп.} + k_{смп.} + k_{с.и.} + k_{кр.}) k_{нв.} G + f_{ск0} (I_{ев} + F_{рвб} \cos(\alpha_4)). \quad (8)$$

Здесь по-прежнему $k = 4$ соответствует воздействию только сопротивления среды $F_{сп.}$ на ПР участке горки до стрелки и $k = 41$ – учёту воздействия сопротивления среды $F_{сп.}$ и проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{рвy}$; $k = 4$ с – учёту воздействия сопротивлений всякого рода $F_{с.}$,



$k = 41с$ – учёту воздействия сопротивлений всякого рода F_c и проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{\text{вв}}$ и $k = 42с$ – учёту воздействия различных сопротивлений при движении вагона по кривому участку пути, кН. В (8) обозначено: α_4 – угол поворота кривых на ПР участке (обычно принимают в зависимости от количества пути на горочной горловине); $k_{\text{стр.}}$, $k_{\text{с.и.}}$ и $k_{\text{кр.}}$ – коэффициенты, учитывающие долю силы тяжести G , а также сопротивления стрелки, снега и инея, кривых (обычно принимают $k_{\text{стр.}} = 0,00015$, $k_{\text{с.и.}} = 0,00015$ (по данным [25] доходит до 0,00025) и $k_{\text{кр.}} = 0,00011$); I_y – поперечная переносная сила инерции (чаще 3 кН и более).

9. По величинам «сдвигающей» $F_{\text{сд.х1}}$ и «удерживающей» $F_{\text{удк.х1}}$ сил вычисляют силу F_k , способствующую движению вагона на ПР участке до и после стрелочного перевода, кН:

$$F_k = F_{\text{сд.х1}} - F_{\text{удк.х1}}. \quad (9)$$

Например, если $F_{\text{сд.х1}} = 11,364$ кН; $F_{\text{удк.х1}} = 0,312$ кН, то $F_4 = 11,052$ кН – сила, при воздействии которой происходит движение вагона с ускорением на ПР участке до стрелки с учётом только сопротивления среды $F_{\text{сп.}}$, а с добавлением еще и проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{\text{уд41.х1}} = 3,048$ кН, то есть $F_{41} = 8,316$ кН.

После стрелочного перевода значения этих сил с учётом воздействия только сопротивлений всякого рода F_c , вычисленные по (2) и (8), таковы: $F_{\text{сд.х1}} = 11,364$ кН, $F_{\text{удк.х1}} = 0,611$ кН, $F_{4с} = 10,753$ кН; с учётом воздействия сопротивлений всякого рода F_c и проекции ветра на боковую сторону вагона – $F_{\text{уд41с.х1}} = 3,3$ кН, $F_{41с} = 8,064$ кН; с учётом воздействия различных сопротивлений и движения вагона по кривому участку пути – $F_{\text{уд42с.х1}} = 3,763$ кН, $F_{42с} = 7,6$ кН.

10. По значению силы F_k и массы вагона M с учётом инерции вращающихся частей находят ускорение вагона a_k при движении на рассматриваемом участке горки с ускорением, м/с^2 (см. (14) [12]):

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

Допустим, если $M = 5,484 \cdot 10^4$ кг – масса вагона с грузом с учётом инерции вращающихся частей вагона и $F_4 = 11,052$ кН, то ускорение вагона, при котором проис-

ходит ускоренное движение до стрелки при наличии сопротивления среды: $a_4 = 0,119$ м/с^2 (если учесть воздействие сопротивления среды и проекции ветра на боковую сторону вагона, то при $F_{41} = 8,316$ кН – $a_{41} = 0,09$ м/с^2). При движении вагона после стрелки по кривому участку пути при воздействии сопротивления всякого рода F_c : $F_{4с} = 10,753$ кН и $a_{4с} = 0,116$ м/с^2 ; при воздействии сопротивления всякого рода F_c с учётом воздействия проекции ветра на боковую сторону вагона при $F_{41с} = 8,064$ кН – $a_{41с} = 0,087$ м/с^2 ; при воздействии сопротивлений всякого рода F_c с учётом движения вагона по кривой $F_{42с} = 7,6$ кН – $a_{42с} = 0,082$ м/с^2 .

11. Вычисляют время t_k , в течение которого происходит прямолинейное равноускоренное движение вагона на ПР участке горки длиной l_k , м (см. (16) [12]):

$$t_k = \frac{-v_{0k} + \sqrt{v_{0k}^2 - 2a_k l_k}}{a_k}, \quad (11)$$

где v_{0k} – начальная скорость вагона (при входе на ПР участок), м/с .

По данным расчётов предыдущих участков, согласно разработанной нами программы проектирования по всей длине сортировочной горки, примем $v_{04} = 5,933$ м/с с учётом воздействия только сопротивления среды $F_{\text{сп.}}$ на ПР участке до стрелки, а с учётом воздействия сопротивления среды и проекции ветра на боковую сторону вагона – $v_{041} = 5,575$ м/с . При движении вагона после стрелки $v_{04с} = 6,323$ м/с с учётом воздействия только сопротивления всякого рода F_c , при воздействии сопротивления всякого рода и проекции ветра на боковую сторону вагона $v_{041с} = 5,889$ м/с , а при воздействии сопротивлении всякого рода с учётом движения вагона по кривой $v_{042с} = 6,14$ м/с .

Например, если $v_{04} = 5,993$ м/с , $a_4 = 0,119$ м/с^2 , $l_4 = 20,001$ м, то время скатывания вагона на ПР участке до стрелки при воздействии только сопротивления среды – $t_4 = 3,264$ с и при воздействии сопротивления среды и проекции ветра на боковую сторону вагона (т.е. $v_{041} = 5,575$ м/с и $a_{41} = 0,09$ м/с^2) – $t_{41} = 3,489$ с. При движении после стрелки, если $v_{04с} = 6,323$ м/с , $a_{4с} = 0,116$ м/с^2 , $l_{4с} = 21,271$ м, то время скатывания вагона при воздействии только сопро-

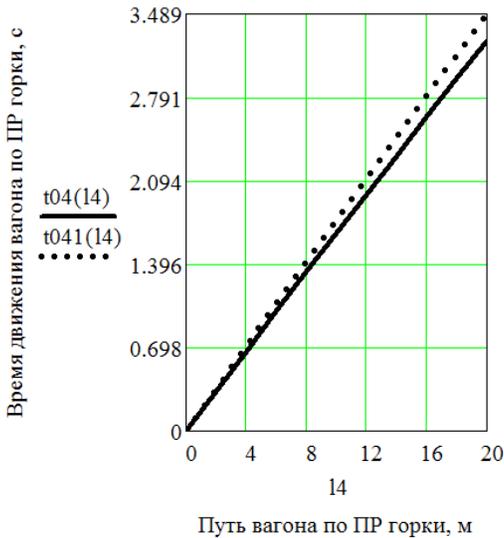


Рис. 3. Графическая зависимость времени движения вагона на промежуточном участке горки до стрелки от пройденного пути.

тивлений всякого рода $-t_{4c} = 3,266$ с, при воздействии еще и проекции ветра на боковую сторону вагона ($v_{041c} = 5,889$ м/с и $a_{41c} = 0,087$ м/с²) $-t_{41c} = 3,521$ с, а при воздействии сопротивлений всякого рода с учётом движения по кривому участку горки ($v_{042c} = 6,14$ м/с и $a_{42c} = 0,082$ м/с²) $-t_{42c} = 3,388$ с.

При необходимости можно построить графическую зависимость $t_k = f(l_k)$.

12. Определяют скорость вагона на ПР участке горки до и после стрелки v_k по классической формуле курса физики, м/с (см. (13) [12]):

$$v_{ek}(t) = v_{0k} + a_k t. \quad (12)$$

К примеру, для заданных исходных данных: $v_{04} = 5,933$ м/с, $a_4 = 0,119$ м/с², $t_4 = 3,264$ с на ПР участке до стрелочного перевода скорость вагона $v(t_4) = 6,323$ м/с или 22,76 км/ч с учётом воздействия только сопротивления среды F_{cp} ; при $v_{041} = 5,575$ м/с, $a_{41} = 0,09$ м/с², $t_{41} = 3,489$ с с учётом воздействия сопротивления среды F_{cp} и проекции ветра на боковую сторону вагона $v(t_{41}) = 5,889$ м/с или 21,2 км/ч. При движении после стрелочного перевода скорость вагона ($v_{04c} = 6,323$ м/с, $a_{4c} = 0,116$ м/с², $t_{4c} = 3,266$ с) $v(t_{4c}) = 6,7$ м/с или 24,1 км/ч с учётом только сопротивлений всякого рода F_c , с учётом воздействия сопротивлений всякого рода F_c и проекции ветра на боковую сторону вагона ($v_{041c} = 5,889$ м/с, $a_{41c} = 0,087$ м/с², $t_{41c} = 3,521$ с)

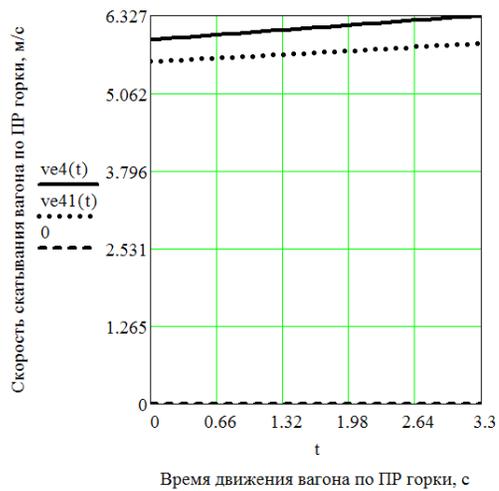


Рис. 4. Графическая зависимость скорости скатывания вагона на ПР участке горки до стрелки от времени движения.

$v(t_{41c}) = 6,19$ м/с или 22,3 км/ч, а при воздействии сопротивлений всякого рода F_c с учётом движения вагона по кривой ($v_{042c} = 6,14$ м/с, $a_{42c} = 0,00046$ м/с², $t_{42c} = 2,642$ с) $v(t_{42c}) = 6,42$ м/с или 23,1 км/ч.

ГРАФИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВРЕМЕНИ И СКОРОСТИ СКАТЫВАНИЯ

Для примера покажем графические зависимости времени движения от длины пройденного пути при $l_4 = 0,2...20$ м и скорости скатывания вагона на ПР участке горки в любой момент времени t до стрелки при $t = 0, 0,1...2,5$ с (рис. 3 и 4).

Время движения вагона $t_k(l_k)$ в зависимости от длины участка сортировочной горки l_j при учёте воздействия только сопротивления среды F_{cp} , а также сопротивления среды F_{cp} и проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{рв}$ (то есть при $j = 4$, чему соответствуют $k = 4; 41$), которое следует из выражения (11).

Скорость скатывания вагона на ПР участке горки в любой момент времени t равноускоренного движения до стрелки вычисляют по (12):

$ve4(t) = v_{04} + a_4 \cdot t$ – скорость вагона $v(t)$ при учёте воздействия только сопротивления среды F_{cp} , м/с;

$ve41(t) = v_{041} + a_{41} \cdot t$ – скорость вагона $v(t)$ при учёте воздействия сопротивления среды F_{cp} и проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{рв}$, м/с.



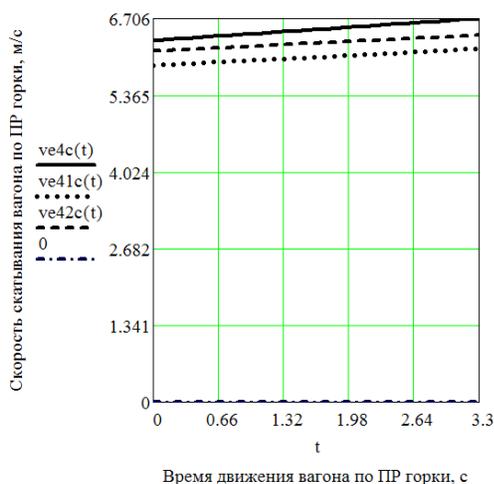


Рис. 5. Графическая зависимость скорости скатывания вагона на промежуточном участке горки после стрелки от времени движения.

Как видно, при равноускоренном движении вагона на ПР участке до стрелки при учёте сопротивления среды и ветра скорость его скатывания увеличивается линейно.

Скорости скатывания в любой момент времени t движения вагона равноускоренно после стрелки находят тем же способом (12):

$ve4c(t) = v_{04c} + a_{4c} \cdot t$ — скорость вагона $v(t)$ при воздействии только сопротивлений всякого рода (среды, стрелки, кривых, снега, инея) F_c , м/с;

$ve41c(t) = v_{041c} + a_{41c} \cdot t$ — скорость $v(t)$ при воздействии сопротивлений всякого рода F_c и с учётом проекции ветра на боковую сторону вагона $F_{в\text{в}y}$, м/с;

$ve42c(t) = v_{042c} + a_{42c} \cdot t$ — скорость $v(t)$ при воздействии сопротивлений всякого рода F_c и с учётом движения вагона по кривому участку горки $F_{к\text{в}y}$, м/с.

Результаты вычислений представлены на рис. 5.

Как следует из рис. 5, скорости скатывания вагона после стрелки при одновременном учёте воздействия сопротивлений всякого рода (среды, стрелок, снега, инея, кривых, ветра) тоже увеличиваются линейно.

Обобщая результаты расчетов с учётом воздействия только сопротивления среды $F_{ср.}$ и ветра, можно отметить, что если время движения вагона до стрелки, например, при $k = 4$ составляет $t_4 = 3,264$ с,

скорость $v(t_4) = 6,323$ м/с или 22,76 км/ч при скорости входа на участок $v_{04} = 5,933$ м/с, а при $k = 41$: $t_{41} = 3,489$, $v(t_{41}) = 5,889$ м/с или 21,2 км/ч, $v_{041} = 5,575$ м/с, то аналогичные данные после стрелки с учётом воздействия сопротивлений всякого рода (среды, стрелок, снега, инея, кривых) F_c и ветра при $k = 4$ с будут равны: $t_{4c} = 3,266$ с, $v(t_{4c}) = 6,7$ м/с или 24,1 км/ч, а при $k = 41$ с: $v_{041c} = 5,589$ м/с, $t_{41c} = 3,521$ с, $v(t_{41c}) = 6,2$ м/с или 22,3 км/ч.

Результаты расчетов показывают, что независимо от того, движется ли вагон до стрелки или после нее, при воздействии только сопротивления среды $F_{ср.}$ или же совместно с проекцией ветра на боковую сторону вагона $F_{в\text{в}y}$, либо сопротивлений всякого рода (среды, стрелки, снега, инея, кривых) F_c с учётом прохождения по кривому участку горки происходит равноускоренное движение вагона. При этом время движения практически не меняется: с $t_4 = 3,264$ с (при $k = 4$) до $t_{4c} = 3,266$ с (при $k = 4$ с), а скорости скатывания вагона увеличиваются с $v_{04} = 5,933$ м/с до $v(t_{4c}) = 6,7$ м/с (при $k = 4$) и с $v_{041c} = 5,575$ м/с до $v(t_{41c}) = 6,2$ м/с (при $k = 4$ с).

ВЫВОДЫ

1. Силовые соотношения, которые имеют место в системе «вагон-путь» на ПР участке при воздействии попутного ветра малой величины с учётом различных видов сопротивлений (среды, стрелки, снега, инея, кривых, ветра) до и после стрелки, позволили определить ускорение вагона при его движении по уклону сортировочной горки.

2. Предложенная упрощённая последовательность расчёта дает возможность по известному значению длины ПР участка горки до и после стрелки l_j найти время движения вагона t_k при различных условиях (воздействие только сопротивлений всякого рода, проекции ветра на боковую сторону вагона и др.), а затем и скорость его скатывания в конце участка $v_k(t_k)$.

3. Расчётами установлено, что на ПР участке горки при воздействии попутного ветра малой величины независимо от учёта различных видов сопротивлений (среды, стрелки, снега и инея, кривых, ветра) до и после стрелки происходит

равноускоренное движение вагона, что означает увеличение скорости его выхода с данного участка по сравнению со скоростью входа на него.

ЛИТЕРАТУРА

1. Turanov, K. T. The dynamics of the wagon rolling down the hump profile under the impact of fair wind. *Direct Research Journals of Engineering and Information Technology (DRJEIT)*. Vol. 2(2). pp. 17–24. May 2014. JSSN 2354–4155 (<http://directresearchpublisher.org/drjet/archive/2014/May/pdf/Turanov.pdf>).

2. Turanov, K. T., Gordienko, A. A. Analytical Determination of Conditions of Wagon Rolling Down Marshalling Hump Profiles. *Open Access Library Journal*, 2, e1912. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101912>. pp. 1–11.

3. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Уточнённые математические модели скорости скатывания вагона по уклону горки при воздействии силы тяжести и попутного ветра // *Транспорт: наука, техника, управление.* – 2015. – № 1. – С. 15–21.

4. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Упрощённые математические модели движения вагона по уклону горки при воздействии силы тяжести и попутного ветра // *Транспорт: наука, техника, управление.* – 2015. – № 3. – С. 20–24.

5. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Исследование движения вагона на прямом участке горки при воздействии попутного ветра // *Транспорт: наука, техника, управление.* – 2015. – № 4. – С. 44–49.

6. 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. – С. 17–23.

7. 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.

8. 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.

9. 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. – С. 37–43.

10. 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.

11. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Новая методика расчёта времени и скорости вагона при его движении на участке первой тормозной позиции сортировочной горки при

воздействии попутного ветра // *Транспорт: наука, техника, управление.* – 2015. – № 11. – С. 26–30.

12. Turanov, K. T., Gordienko, A. A., Myagkova, A. 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)*, Vol. 2, Issue 11, November – 2015. ID: JMESTN42351205. Berlin, Germany. JSSN: 3159–0040 (Online).

13. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Математическое описание движения вагона с торможением на участке первой тормозной позиции сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины // *Транспорт Урала.* – 2015. – № 4. – С. 10–15.

14. Turanov, K. T., Gordienko, A. A., Plakhovich, I. S. Simplified Analytical Description of Wagon Movement with Braking Action on the Marshalling Hump Section of the First Braking Position under the Impact of Fair Wind. *Science and Technology*, Vol. 5, No. 4, December 2015, pp. 57–62. e-JSSN: 2163–2677. (ID: 104000150) doi: 10.5923/j.scit.2015.04.01.

15. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А., Плахотич И. С. Пример расчёта скорости вагона на участке первой тормозной позиции сортировочной горки с затормаживанием при воздействии попутного ветра // *Бюллетень транспортной информации.* – 2015. – № 12. – С. 24–29.

16. Туранов Х. Т., Гордиенко А. А. Движения вагона на сортировочной горке при попутном ветре // *Мир транспорта.* – 2015. – № 6. – С. 36–48.

17. Приложение 3 к СМГС «Технические условия размещения и крепления грузов». [Электронный ресурс]; <http://osjd.org/doco/public/ru>. Доступ 31.12.2015.

18. Рудановский В. М. Об определении удельных сопротивлений движению вагонов на путях с переменным уклоном // *Вестник ВНИИЖТ.* – 1969. – № 1. – С. 46–50.

19. Старшов И. П. Определение воздушного сопротивления движению вагонов на сортировочных горках // *Вестник ВНИИЖТ.* – 1970. – № 6. – С. 16–20.

20. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок // Под ред. Е. А. Сотникова. – М.: Транспорт, 1975. – 104 с.

21. Устенко А. Б., Рудановский В. М., Фонарев Н. М. Оценка надежности и эффективности систем прицельного регулирования скорости движения вагонов на сортировочных горках // *Повышение надежности технических средств на станциях: Сб. науч. трудов.* – М.: Транспорт, 1984. – С. 21–35.

22. Кобзев В. А., Шмаль В. А. Особенности расчёта спускной части сортировочных горок методом покординатного спуска // *Наука и техника транспорта.* – 2014. – № 1. – С. 17–20.

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

24. Земблинов С. В., Страковский И. И. Альбом схем элементов станций и узлов. – М.: МПС, 1963. – 89 с.

25. Образцов В. Н. Станции и узлы. – Ч. II. – М.: Трансжелдориздат, 1938. – 492 с.

26. Кирьянов Д. В. *Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0.* – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с. ●

Координаты авторов: **Туранов Х. Т.** – khturanov@yandex.ru, **Гордиенко А. А.** – gordiii89@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 31.12.2015, принята к публикации 16.05.2016.

