

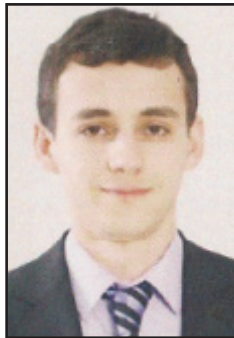


Расчёт времени движения и скорости вагона на промежуточном участке сортировочной горки при попутном ветре



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

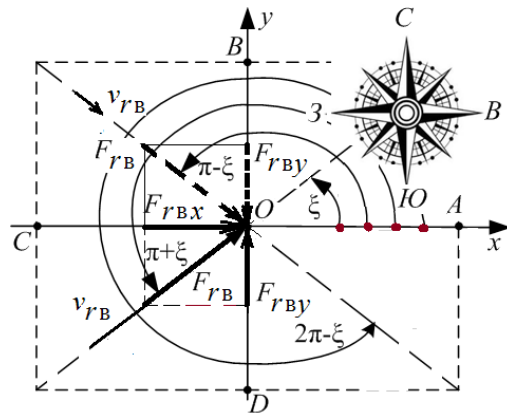


Рис. 1. Диаграмма попутного ветра юго-восточного или северо-восточного направлений.

и $k = 41$ – учёту воздействия сопротивления среды F_{cp} и проекции ветра на боковую сторону вагона F_{rBy} ; $k = 4$ 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_{rBy} 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_{rBy} (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.

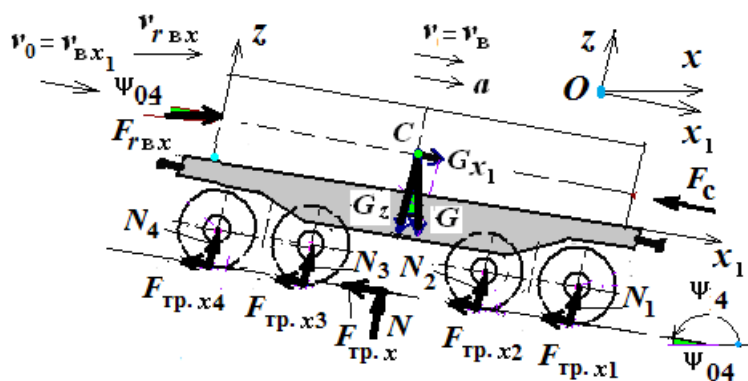
Общие подходы к решению задачи [12, 16] заключаются в следующем.

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_{rB} (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 $Ox_1y_1z_1$, 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_B – 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_τ , 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_τ , 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

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

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 $F_{\text{удк.х1}} = 3,048$ 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 – $F_{\text{удк.х1}} = 3,3$ кН, $F_{41с} = 8,064$ кН; с учётом воздействия различных сопротивлений и движения вагона по кривому участку пути – $F_{\text{удк.х1}} = 3,763$ 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-

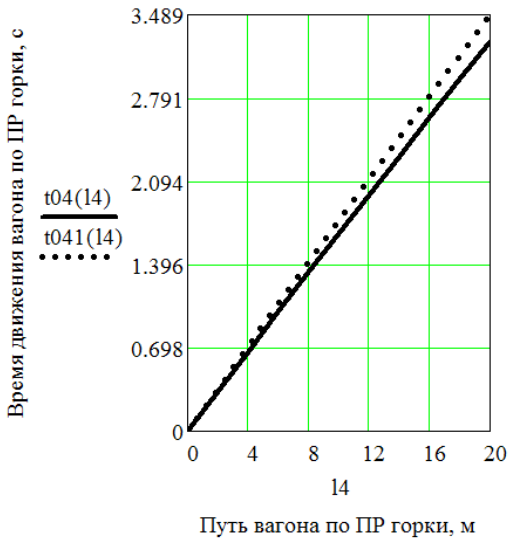


Рис. 3. Графическая зависимость времени движения вагона на промежуточном участке горки до стрелки от пройденного пути.

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)

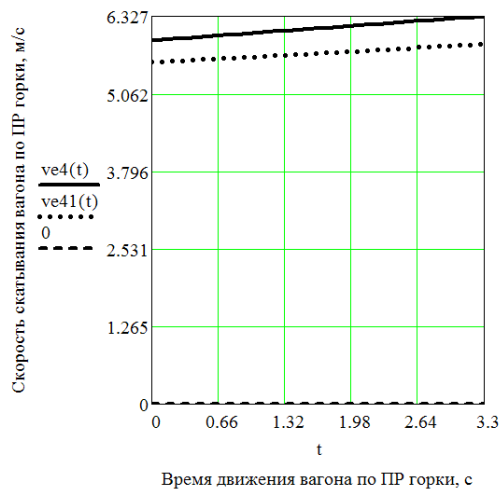


Рис. 4. Графическая зависимость скорости скатывания вагона на ПР участке горки до стрелки от времени движения.

$v(t_{41c}) = 6,19$ 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.



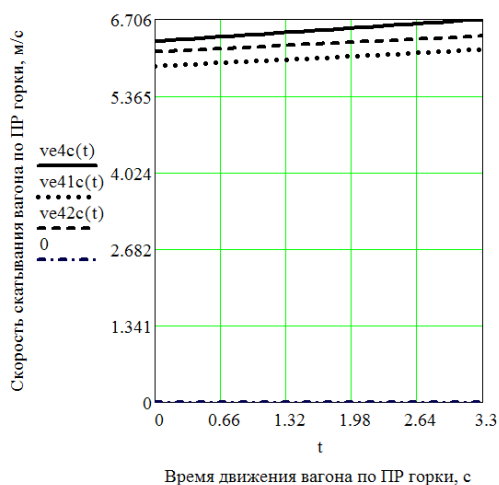


Рис. 5. Графическая зависимость скорости скатывания вагона на промежуточном участке горки после стрелки от времени движения.

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 $F_{гв}$, 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 $F_{гв}$, 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_{cp} 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_{cp} или же совместно с проекцией ветра на боковую сторону вагона $F_{гв}$, 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.





CALCULATION OF TIME OF MOVEMENT AND SPEED OF A CAR ON THE INTERMEDIATE SECTION OF THE HUMP YARD UNDER TAIL WIND

Turanov, Khabibulla T., Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, Russia.
Gordienko, Andrey A., Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, Russia.

ABSTRACT

The dynamics of the car rolling from a hump yard at a railway station is studied in its various aspects. The authors have also touched upon this topic repeatedly (see, in particular, World of Transport and Transportation, 2015, Iss. 6). However, earlier reports lacked estimates of time

of movement and speed of a car on the intermediate section of the hump yard under the influence of tail wind of low speed. The published article fills this gap, introduces the results of calculations, mathematical and graphical dependencies enabling to make certain generalizations and conclusions.

Keywords: principle of D'Alembert, classical formulas of path and velocity of bodies, railway station, hump yard, intermediate section, tail wind, time and speed of car's rolling.

Background. The results of analytical studies of the car driving on the slope of the hump yard, when the force of aerodynamic tail wind resistance \bar{F}_{rw}

depends on the square of velocity, i.e. $\bar{F}_{rw} = f(\bar{v}_{rw}^2)$

(where \bar{v}_{rw} is relative wind speed in relation to the car)

are set forth in [1–5]. In [3–5], there are data of numerical experiments with construction of graphical dependences of car's rolling speed from the slope of the hump yard. However, the analytical formulas for determining car speed when it is moving on the slope are complicated for practical use. That is exactly why in [6–16] cases are studied where the aerodynamic resistance force \bar{F}_{rw} of tail wind of small value (for example, with tail wind of 2–4 m/s) depends linearly on the windward area of the car with a load $F_{rw} = f(A_{vw})$.

This approach is widely used in fastening of loads on cars [17], in which it is assumed that the specific pressure per 1 m² of area of the car with load is equal to 0,5 kN/m².

In [6–8] attempts were made to construct a simplified mathematical model of car movement under the influence of tail wind of small value, but in them there are some inaccuracies in the presentation of diagram of tail wind speed and speed of car movement on the slope. These inaccuracies, in fact, did not affect the results of calculation on time of movement and speed of car's rolling, as set out in [9, 10], which is associated with a slight angle of inclination of the hump ψ_0 , since $\cos \psi_0 \approx 1$ [11].

In [12] force relations are shown that arise in the system of «car-track», they are considered separately for the hump section before and after the turnout switch. In [13–15] car movement on the section of the first brake position with braking when exposed to tailwind of small value. In this the problem of determining car speed and braking distance according to braking time, including before the car stops, is solved.

Despite the large number of studies on dynamics of car's rolling from the hump, there are still no examples of calculation of travel time and speed of car's rolling on an intermediate section (hereinafter – INT section) of the hump yard when exposed to tailwind of small value. This article aims to make a real step in this direction.

Objective. The objective of the authors is to calculate time of movement and speed of a car, when it moves on an intermediate section of the hump yard under tail wind.

Methods. The authors use general scientific and engineering methods, graph construction, mathematical calculation.

Results.

Approaches to task solution

In this case, movement of car on INT section of the hump under tail wind according to [16] is divided into two phases: in the first one a car moves to the turnout switch, in the second – after the switch on the curved section.

It is necessary to receive a sample calculation of time and car speed by the simplified procedure where for the known value of INT section of the hump $l_j = x(t_k)$ it will be possible to find time t_{kj} during which motion occurs at a predetermined initial speed before and after the turnout switch, and for the time value – car speed $v_{ek}(t_{kj})$. Hereinafter, according to [12], $k=4$ corresponds to accounting of only environment resistance F_{env} on INT section of the hump to the switch and $k=41$ to accounting of impact of environment resistance F_{env} and wind projection on a lateral side of the car F_{rwy} ; $k=4c$ – to accounting of impact of resistance of any kind (environment, switches, curves, snow and frost) F_r on INT section of the hump after the switch, $k=41c$ – to accounting of impact resistance of any kind F_r and wind projection on a lateral side of the car F_{rwy} and $k=42$ s – to simultaneous accounting of impact of resistance of any kind F_r , transverse inertial forces I_{oy} and wind projection on a lateral side of the car F_{rwy} (impact of different resistances when the car is moving on a curved section of the track). Hereinafter, $j=4$ corresponds to the case when $k=4, 41, 42$, and $j=4s$ – when $k=4s, 41s, 42s$.

General approaches to task solution [12, 16] are as follows

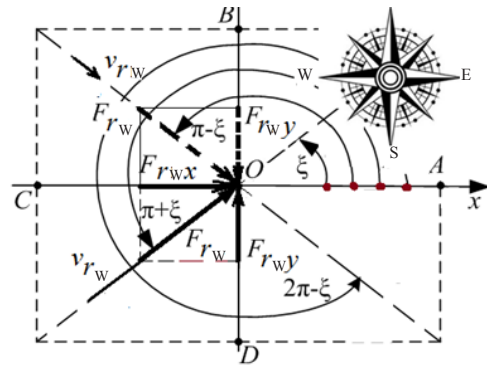
1. In considering car movement from the hump yard the basic principle of D'Alembert in coordinate form [23] and the classic formula of speed and path from the physics course are used.

2. In the context of the tasks and taken assumptions a case arises where the car along the slope of the hump yard enters INT section with a given initial speed v_{ok} . When a single car enters, we believe that it will be mainly influenced by external forces in the form of its own weight with load G , projection of aerodynamic drag force of tailwind of small value F_{rw} (e.g., south-east or north-east direction) along the longitudinal axis Ox and the transverse axis Oy as F_{rwx} and F_{rwy} , i.e.

$\bar{F}_{rwx}, \bar{F}_{rwy} \in \bar{F}_{rw}$ (Pic. 1), bearing in mind that in its

projection of aerodynamic drag forces are taken as dependent only on the area of the windward surface of the car with cargo, as is in the case of dealing with the problem of fastening cargo on cars [7].

Pic. 1 indicates: \bar{v}_{rw} – absolute speed of tailwind; $\pi + \xi$ – directional angle of vector of absolute speed of wind \bar{v}_{rw} relative to the horizontal (axis Ox) for south-west direction; \bar{F}_{rw} – force of impact of tail wind; $F_{rw,x}$ and $F_{rw,y}$ – projections of impact force \bar{F}_{rw} of a tail wind on Ox and Oy, i.e. $(\bar{F}_{rw,x}, \bar{F}_{rw,y}) \in \bar{F}_{rw}$. Note that if the wind is of north-east direction, then the force $F_{rw,y}$ has an opposite direction.



Pic. 1. Diagram of tailwind of south-east and north-east directions.

3. When forming the calculation model of movement of the car on INT section of the hump to the switch an assumption is made that the wheel sets on rail strands move under pure rolling of the wheels relative to the tread surface of rail lines $F_{rol,fr}$ and sliding friction of wheel flanges on the side surface of the rail line $F_{sl,fr}$ by taking into account the impact of wind projection on a lateral side of the car $F_{rw,y}$, i.e. $F_{fr,x} = F_{\tau} = F_{rol,fr} + F_{sl,fr}$. When the car is moving on a curved section of the track after the switch in addition to resistance of any kind F_r , it is necessary also to take into account the impact of transverse inertial force I_y and projections of force $F_{rw,y}$ on the direction of the latter force.

In line with this simplified calculation model of movement of the car on INT section of the hump is shown in Pic. 2, where O is origin of the moving coordinate system Ox,yz, rigidly connected with the car; Ox is axis in horizontal direction; ψ_{04} is angle of slope (descent) of INT section of the hump; v_{04} is relative air speed; $v_0 = v_{wx1}$ is initial speed of the car; v_w is the speed of the car; $F_r = F_{env}$ is force of resistance of environment before the switch and after the switch F_r is force of resistance of any kind; N and $F_{fr,x}$ are normal and tangential components of the reaction of links (of rail lines). And $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ and $F_{tr,x} = F_{fr,x1} + F_{fr,x2} + F_{fr,x3} + F_{fr,x4}$ act as parallel forces.

Thus, using the basic principle of D'Alembert and the classic formulas of path and speed of the body with the known value of INT section of the hump $l_k = x(t_k)$ and in accordance with [16] are identified time t_{k1} in which the car is moving at a given initial speed v_{0k} to the beginning of the switch turnout and l with the value of time t_k – car speed $v_{ek}(t_k)$. Similarly, time of movement t_{k2} and car speed $v_{ek}(t_{k2})$ after the switch to the beginning of the second brake position are found.

Simplified sequence of actions

Note that the following formulas were determined by us earlier [12]. The original results are calculated values of forces that promote and / or impede car movement on INT section of the hump, as well as the values of acceleration, time, motion and rolling speed of the car. A simplified sequence of calculating the car speed on INT section before and after the switch turnout under tail wind, as in [12, 16] can be represented as follows.

1. Let's consider a case of hump neck designing on track 24. When designing a hump yard the full length of INT section l_k is taken according to the recommendations [24]. For example, the slope of the hump 9 ppm, $\psi_{04} = 0,009$ rad. ($\sin(\psi_{04}) = 0,009$), the length of the section to the switch $l_4 = 20,001$ m, and after the switch $l_{4c} = 21,271$ m.

2. The projections of the impact force of a tail wind on the car, such as the south-western direction, along the longitudinal Ox and transverse Oy₁ axis (in Pic. 2 Oy₁ axis is not shown) in the form (2) [12], kN:

$$F_{rw,x} = 0,5A_c; \quad F_{rw,y} = 0,5A_c, \quad (1)$$

where 0,5 is specific pressure per 1 m² of the area, kN/m² [17]; A_p is area of end surface of a car with cargo, m²; A_l is area of lateral surface of a car with cargo, m². For example, if $A_p = 6,384$ and $A_l = 27,36$ m², then $F_{rw,x} = 3,192$ and $F_{rw,y} = 13,68$ kN.

3. The «shearing» force $F_{sh,x1}$ is calculated (i.e., the projection of gravity force of the car with cargo G_{x1} and impact force of a tail wind $F_{rw,x}$ on the direction of car rolling on the axis Ox₁) – see Pic. 2 and (3), [12]:

$$F_{sh,x1} = G \sin(\psi_{0k}) + F_{rw,x} \cos(\psi_{0k}), \quad (2)$$

where G is gravity force of a car with cargo, taking into account the inertia of rotating masses, kN.

For example, if $G = 908$ kN, $\sin(\psi_{04}) = 0,009$, $F_{rw,x} = 3,192$ kN, $\cos(\psi_{04}) = 1$, then $F_{sh,x1} = 11,364$ kN.

4. Rolling friction force $F_{fr,rol}$ is determined depending on the projection of gravity force of the car with a cargo G_z and a tail wind resistance force $F_{rw,x}$ on the direction of Oz axis (see Pic. 2) as the tangential component of reaction of connection (of rail lines) F_c , which according to the Coulomb's law is (see (7), [12]):

$$F_{fr,rol} = f_0 (G \cos(\psi_{04}) + F_{rw,x} \sin(\psi_{04})); \quad (3)$$

where f_0 is some resulted rolling friction coefficient, taking into account the number of wheels in bogies, rolling friction (on bearing's rings and wheel on the rail) (usually take $f_0 = 0,0001$) [1–5].

For example, if $f_0 = 0,0001$, $G = 908$ kN – gravity force of a car with cargo taking into account the inertia of rotating masses (wheel sets) (excluding this inertia $G = 794$ kN at gravity force of cargo $G_{cargo} = 650$ kN), $\cos(\psi_{04}) = 1$, $F_{rw,x} = 3,192$ kN, $\sin(\psi_{04}) = 0,009$, then $F_{fr,x1} = F_{fr,rol} = 0,094$ kN.

5. Sliding friction force $F_{fr,sl}$ from the influence of wind projection on a lateral side of the car $F_{rw,y} = F_{rw,y}$ with account of this force as a tangential component of reaction of connection (of rail lines) F_c , which according to Coulomb's law is determined by the expression (10b [12]):

$$F_{fr,lx} = F_{fr,sl} = f_{sl0} F_{nyy} = f_{sl0} F_{ry}, \quad (4)$$

where f_{sl0} is coefficient of sliding friction of wheel flanges on the lateral surface of a rail line (usually take up to $f_{sl0} = 0,25$) [12–14]. For example, if $f_{sl0} = 0,2$, $F_{rw,y} = 13,68$ kN, then $F_{fr,lx} = F_{fr,sl} = 2,736$ kN.

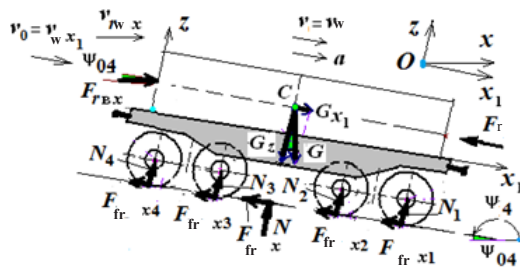
6. Based on (3) and (4) is calculated the frictional force along the car movement as the sum of rolling friction forces $F_{fr,rol}$ and sliding friction forces $F_{fr,sl}$ taking into account the impact of wind projection on the lateral side of the car $F_{rw,y}$ in the form

$$F_{fr,x1} = F_r = F_{fr,rol} + F_{fr,sl}. \quad (5)$$





Pic. 2. Simplified calculation model of car movement on the profile of INT section of the hump under tail wind.



For example, if $F_{fr.rol.} = 0,094$, $F_{fr.sl.} = 2,736$ kN, then $F_{fr.x1} = 2,954$ kN.

7. Determine the Forces of resistance to movement of the car from the environment $F_{env.}$ as (10b) [12]:

$$F_{env.} = k_{env.} \cdot k_{in.} \cdot G, \quad (6)$$

where $k_{env.}$ is coefficient, taking into account the share of gravity force G at accounting of environmental resistance (usually within 0,0001–0,0005 at a speed of tail wind from 2 to 4 m/s) [25, p. 182]; $k_{in.}$ is coefficient, taking into account the inaccuracy of calculations $k_{env.}$ (usually taken up to 1). For example, if $k_{env.} = 0,0003$, $k_{in.} = 0,8$ and $G = 908$ kN, then $F_{env.} = 0,218$ kN.

8. The «holding» forces $F_{shk.x1}$ are calculated resisting the movement of the car on INT section of the hump before and after the switch turnout in the form (see (12), [16]):

$$F_{shk.x1} = F_{fr.rol.} + F_{env.} + F_{fr.sl.}; \quad (7)$$

$$F_{shk.x1} = f_0 (G \cos(\psi_{04}) + F_{rwx} \sin(\psi_{04})) + (k_{env.} + k_{sw.} + k_{s.f.} + k_{cur.}) k_{in.} G + f_{sl0} (I_{ey} + F_{rwo} \cos(\alpha_4)). \quad (8)$$

Here again $k = 4$ corresponds to the impact of only resistance of environment $F_{env.}$ on INT section of the hump to the switch and $k = 41$ – to accounting of impact of resistance of environment $F_{env.}$ and wind projection on a lateral side of the car F_{rwx} ; $k = 4c$ – to accounting of resistance of any kind F_r ; $k = 41c$ – to accounting of impact of resistance of any kind F_r and wind projection on a lateral side of the car F_{rwx} and $k = 42c$ – to accounting of impact of different resistances when the car is moving on a curved section of the track, kN. In (8) there are following indications: α_4 is rotation angle of curves on INT section (are usually taken depending on the number of tracks on the hump neck); $k_{sw.}$, $k_{s.f.}$ and $k_{cur.}$ – coefficients, taking into account the share of gravity force G , as well as resistance of the switch, snow and frost, curves (usually are taken $k_{sw.} = 0,00015$, $k_{s.f.} = 0,00015$ (according to [25] it comes to 0,00025) and $k_{cur.} = 0,00011$); I_{ey} – transverse inertial force (often 3 kN and more).

9. Using the value of «shearing» $F_{sh.x1}$ and «holding» $F_{hol.k.x1}$ forces is calculated force F_k which facilitates the movement of the car on INT section before and after the switch turnout, kN:

$$F_k = F_{sh.x1} - F_{hol.k.x1}. \quad (9)$$

For example, if $F_{sh.x1} = 11,364$ kN; $F_{hol.k.x1} = 0,312$ kN, then $F_k = 11,052$ kN – force, under which impact the car moves with acceleration on INT section before the switch, taking into account only the resistance of environment $F_{env.}$ and with addition of wind projection on a lateral side of the car $F_{sh41.x1} = 3,048$ kN, i.e. $F_{41} = 8,316$ kN.

After the switch turnout the values of these forces with account of influence of only resistance of any kind F_r , calculated by (2) and (8), are such: $F_{sh.x1} = 11,364$ kN, $F_{sh4c.x1} = 0,611$ kN, $F_{4c} = 10,753$ kN; taking

into account resistance of any kind F_r and wind projection on a lateral side of the car – $F_{sh41c.x1} = 3,3$ kN, $F_{41c} = 8,064$ kN; taking into account the influence of various resistances and movement of the car on a curved section of the track – $F_{sh42c.x1} = 3,763$ kN, $F_{42c} = 7,6$ kN.

10. According to the value of force F_k and the mass of the car M taking into account the inertia of rotating parts is calculated acceleration of the car a_k when moving on the considered section of the hump with acceleration, m/s^2 (see (14), [12]):

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

For example, if $M = 5,484 \cdot 10^4$ kg – mass of the car with cargo, taking into account the inertia of rotating parts of the car and $F_k = 11,052$ kN, then acceleration of the car, when takes places accelerated movement before the switch in the presence of resistance of environment: $a_4 = 0,119$ m/s^2 (if consider the impact of resistance of environment and wind projection on a lateral side of the car, then at $F_{41} = 8,316$ kN – $a_{41} = 0,09$ m/s^2). When the car moves after the switch on a curved section under the influence of resistance of any kind F_r : $F_{4c} = 10,753$ kN and $a_{4c} = 0,116$ m/s^2 ; under the influence of resistance of any kind F_r . With account of impact of wind projection on lateral side of the car at $F_{41c} = 8,064$ kN – $a_{41c} = 0,087$ m/s^2 ; under the influence of resistance of any kind F_r . With account of movement of the car on a curved section $F_{42c} = 7,6$ kN – $a_{42c} = 0,082$ m/s^2 .

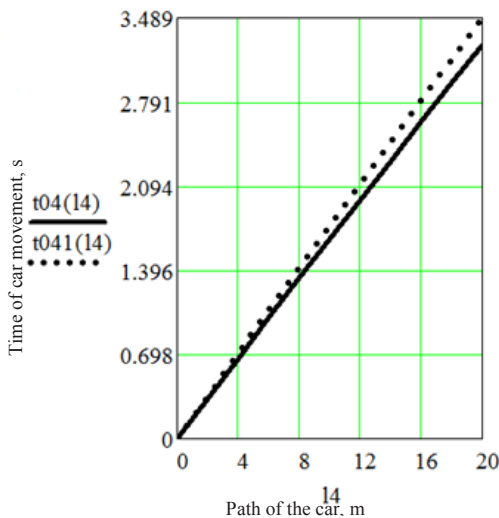
11. Time t_k during which occurs rectilinear uniformly accelerated motion of the car on INT section with the length of l_k , m (see (16), [12]):

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

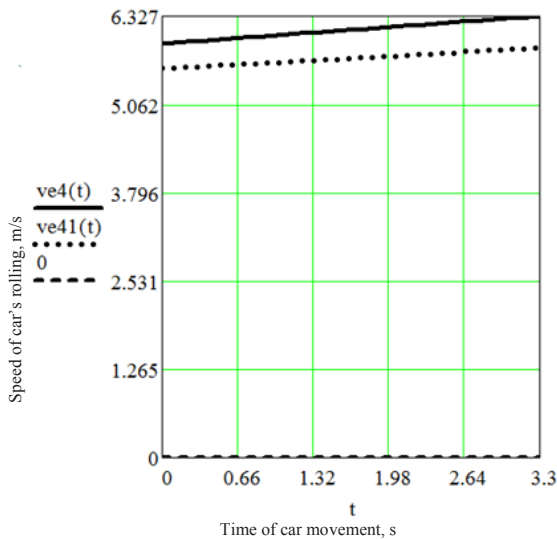
where v_{0k} is initial speed of the car (at the entrance to INT section), m/s .

According to the calculations of the previous sections, according to the design program which we have developed for the entire length of the hump yard, we assume that $v_{04} = 5,933$ m/s with account of the influence of only resistance of the environment $F_{env.}$ on INT section to the switch, but with account of the influence of resistance of environment and wind projection on lateral side of the car – $v_{041} = 5,575$ m/s . During movement of the car after the switch $v_{04c} = 6,323$ m/s with account of influence of only resistance of any kind F_r , under the influence of resistance of any kind and wind projection on lateral side of the car $v_{041c} = 5,889$ m/s , and under the influence of resistance of any kind with account of movement of the car on a curved section $v_{042c} = 6,14$ m/s .

For example, if $v_{04} = 5,993$ m/s , $a_4 = 0,119$ m/s^2 , $l_4 = 20,001$ m, the time of car's rolling on INT section to the switch under the influence of only resistance of environment – $t_4 = 3,264$ s and under the impact of resistance of environment and wind projection on



Pic. 3. Graphic dependence of car movement on the intermediate section of the hump to the switch on the distance covered.



Pic. 4. The graphic dependence of speed of car's rolling on INT section of the hump to the switch on time of movement.

lateral side of the car (i.e. $v_{041} = 5,575$ m/s and $a_{41} = 0,09$ m/s²) – $t_{41} = 3,489$ s. During movement after the switch, if $v_{04c} = 6,323$ m/s, $a_{4c} = 0,116$ m/s², $l_{4c} = 21,271$ m, then time of car's rolling under the influence of resistance of any kind – $t_{4c} = 3,266$ s, under the influence of also wind projection on lateral side of the car ($v_{041c} = 5,889$ m/s and $a_{41c} = 0,087$ m/s²) – $t_{41c} = 3,521$ s, and under the influence of resistance of any kind with account of movement on a curved section of the hump ($v_{042c} = 6,14$ m/s and $a_{42c} = 0,082$ m/s²) – $t_{42c} = 3,388$ s.

If necessary, it is possible to construct a graphic dependence $t_k = f(l_k)$.

12. Speed of the car on INT section of the hump before and after the switch v_k is determined according to the classical formula of physics course, m/s (see (13), [12]):

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

For example, for set initial data: $v_{04} = 5,933$ m/s, $a_4 = 0,119$ m/s², $t_4 = 3,264$ s on INT section to the switch turnout the speed of the car $v(t_4) = 6,323$ m/s or 22,76 km/h with account of only resistance of environment F_{env} ; at $v_{041} = 5,575$ m/s, $a_{41} = 0,09$ m/s², $t_{41} = 3,489$ s with account of influence of resistance

of environment F_{env} and wind projection on lateral side of the car $v(t_{41}) = 5,889$ m/s or 21,2 km/h. During movement after the switch turnout the speed of the car ($v_{04c} = 6,323$ m/s, $a_{4c} = 0,116$ m/s², $t_{4c} = 3,266$ s) $v(t_{4c}) = 6,7$ m/s or 24,1 km/h with account of only resistance of any kind F_r , with account of influence of resistances of any kind F_r and wind projection on lateral side of the car ($v_{041c} = 5,899$ m/s, $a_{41c} = 0,087$ m/s², $t_{41c} = 3,521$ s) $v(t_{41c}) = 6,19$ m/s or 22,3 km/h, but under the influence of resistances of any kind F_r with account of movement of the car on a curved section ($v_{042c} = 6,14$ m/s, $a_{42c} = 0,00046$ m/s², $t_{42c} = 2,642$ s) $v(t_{42c}) = 6,42$ m/s or 23,1 km/h.

Graphic dependence of time and speed of rolling

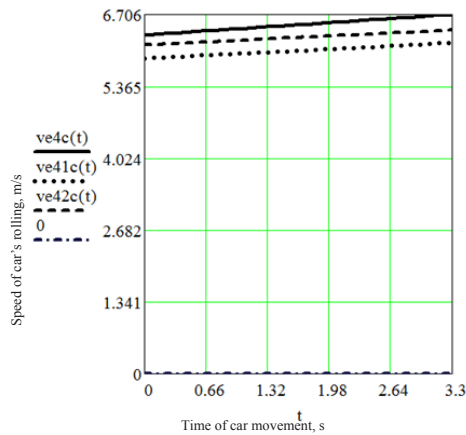
We show as an example graphic dependencies of time of motion on the length of distance covered at $l_4 = 0,2..20$ m – and speed of car's rolling on INT section of the hump at any time moment t to the switch at $t = 0, 0,1..2,5$ s. (Pic. 3 and 4).

Time of car movement $t_k(l_k)$ depending on the length of section of the hump yard l , with account of only resistance of environment F_{env} , as well as resistance of environment F_{env} and wind projection on lateral side of the car F_{rwy} (i.e. at $j = 4$, which





Pic. 5. The graphic dependence of speed of car's rolling on the intermediate section of the hump after the switch on time of movement.



corresponds to $k = 4; 41$), which follows from (11):

The speed of car's rolling on INT section of the hump at any time moment t of uniformly accelerated movement to the switch is calculated according to (12):

$ve4(t) = v04 + a4 \cdot t$ – car speed $v(t)$ with account of only resistance of environment F_{env} , m/s;

$ve41(t) = v041 + a41 \cdot t$ – car speed $v(t)$ with account of impact of resistance of environment F_{env} and wind projection on lateral side of the car F_{rwy} , m/s.

As can be seen, in case of uniformly accelerated movement of the car on INT section to the switch with account of resistance of environment and wind its rolling speed increase linearly.

Rolling speed at any time moment t of car movement uniformly accelerated after the switch is found by the same method (12):

$ve4c(t) = v04c + a4c \cdot t$ – car speed $v(t)$ under the influence of only resistance of any kind (environment, switch, curves, snow, frost) F_r , m/s;

$ve41c(t) = v041c + a41c \cdot t$ – speed $v(t)$ under the influence of resistance of any kind F_r and with account of wind projection on lateral side of the car F_{rwy} , m/s;

$ve42c(t) = v042c + a42c \cdot t$ – speed $v(t)$ under the influence of resistance of any kind F_r and with account of car movement on a curved section of the hump $F_{rwy,p}$, m/s.

The calculation results are shown in Pic. 5.

As follows from Pic. 5, speed of car's rolling after the switch at simultaneous account of resistance of any kind (environment, switches, snow, frost, curves, wind) increase also linearly.

Summarizing the calculation results with account of only resistance of environment F_{env} and wind, it can be noted, that if time of car movement to the switch, for example, at $k = 4$ is $t_4 = 3,264$ s, speed $v(t_4) = 6,323$ m/s or 22,76 km/h at speed of car entrance to the section $v_{04} = 5,933$ m/s, and at $k = 41$: $t_{41} = 3,489$, $v(t_{41}) = 5,889$ m/s or 21,2 km/h, $v_{041} = 5,575$ m/s, then similar data after the switch with account of resistance of any kind (environment, switches, snow, frost, curves) F_{env} and wind at $k = 4c$ will be: $t_{4c} = 3,266$ c, $v(t_{4c}) = 6,7$ m/s or 24,1 km/h, and at $k = 41c$: $v_{041c} = 5,589$ m/s, $t_{41c} = 3,521$ s, $v(t_{41c}) = 6,2$ m/s or 22,3 km/h.

The calculation results show that regardless of whether a car moves to the switch or after it, under the influence of only resistance of environment F_{env} or together with wind projection on lateral side of the car F_{rwy} , or resistances of any kind (environment, switch, snow, frost, curves) F_r with account of car passing on the curved section of the hump occurs uniformly accelerated car movement. At the same time time of

movement remains practically unchanged: from $t_4 = 3,264$ s (at $k = 4$) to $t_{4c} = 3,266$ s (at $k = 4c$), and speeds of car rolling increase from $v_{04} = 5,933$ m/s to $v(t_{4c}) = 6,7$ m/s (at $k = 4$) and from $v_{041c} = 5,575$ m/s to $v(t_{41c}) = 6,2$ m/s (at $k = 4c$).

Conclusions.

1. Power ratios that occur in the system «car-track» on INT section under tail wind of small value with account of different kinds of resistance (environment, switch, snow, curves, wind) to and after the switch, allowed to determine acceleration of the car at its movement on the slope of the hump yard.

2. The proposed simplified sequence of calculation makes it possible using the known value of the length of INT section of the hump to and after the switch l_j to find time of car movement t_k under different conditions (influence of only resistances of any kind, wind projection on lateral side of the car etc.), and then speed of its rolling at the end of the section $v_k(t_k)$.

3. Calculation found that on INT section of the hump under tail wind of small value regardless of accounting of different kinds of resistance (environment, switch, snow and frost, curves, wind) before and after the switch occurs uniformly accelerated motion of the car, which means the increase of speed of its exit from this section compared to the speed of entrance into this section.

REFERENCES

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)*, May 2014, Vol. 2(2), pp. 17–24.
2. Turanov, K. T., Gordienko, A. A. Analytical Determination of Conditions of Wagon Rolling Down Marshaling Hump Profiles. *Open Access Library Journal*, 2015, Iss. 2, pp. 1–11.
3. Turanov, K. T., Gordienko, A. A. The specified mathematical models of speed of car's rolling on the slope of the hump under the influence of gravity force and tailwind [Utochnjonnje matematicheskie modeli skorosti skatyvanija vagona po uklonu gorki pri vozdejstvii sily tjazhesti i poputnogo vetra]. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie*, 2015, Iss. 1, pp. 15–21.
4. Turanov, K. T., Gordienko, A. A. The specified mathematical models of speed of car's rolling on the slope of the hump under the influence of gravity force and tailwind [Utochnjonnje matematicheskie modeli skorosti

skatyvanija vagona po uklonu gorki pri vozdeystvii sily tjazhesti i poputnogo vetra]. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie*, 2015, Iss. 3, pp. 20–24.

5. Turanov, K. T., Gordienko, A. A. Research of car movement on the straight section of the hump under tail wind [Issledovanie dvizhenija vagona na prjamom uchastke gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra]. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie*, 2015, Iss. 4, pp. 44–49.

6. Turanov, K. T., Gordienko, A. A. Mathematical model of time of car rolling on the first speed section of the hump yard under tail wind of small value [Matematicheskaja model' vremeni skatyvanija vagona na pervom skorostnom uchastke sortirovochnoj gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloj velichiny]. *Bulletin of Transport Information*, 2015, Iss. 6, pp. 17–23.

7. Turanov, K. T., Gordienko, A. A. Analytical determination of time of car from rolling on the second speed section of the hump yard under tail wind of small value [Analiticheskoe opredelenie vremeni skatyvanija vagona na vtorom skorostnom uchastke sortirovochnoj gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloj velichiny]. *Nauka i tehnika transporta*, 2015, Iss. 2, pp. 73–81.

8. Turanov, K. T., Gordienko, A. A. Determination of time and speed of car rolling before the first hump braking position of the hump yard under tail wind of small value [Opredelenie vremeni i skorosti skatyvanija vagona pred pervoj gorochnoj tormoznoj poziciej sortirovochnoj gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloj velichiny]. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie*, 2015, Iss. 7, pp. 25–30.

9. Turanov, K. T., Gordienko, A. A. New method of calculating time and speed of car rolling on the first speed section of the hump yard [Novaja metodika raschjota vremeni i skorosti skatyvanija vagona na pervom skorostnom uchastke sortirovochnoj gorki]. *Bulletin of Transport Information*, 2015, Iss. 8, pp. 37–43.

10. Turanov, K. T., Gordienko, A. A. Example of calculation of time and speed of car's rolling at the second speed section of the hump yard under tail wind of small value using a new technique [Primer raschjota vremeni i skorosti skatyvanija vagona na vtorom skorostnom uchastke sortirovochnoj gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloj velichiny po novoj metodike]. *Nauka i tehnika transporta*, 2015, Iss. 3, pp. 63–70.

11. Turanov, K. T., Gordienko, A. A., Plakhotich, I. S. The new method of calculating time and speed of the car when driving on a section of the first braking position of the hump yard under tail wind [Novaja metodika raschjota vremeni i skorosti vagona pri ego dvizhenii na uchastke pervoj tormoznoj poziciji sortirovochnoj gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra]. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie*, 2015, Iss. 11, pp. 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, November 2015, Issue 11.

13. Turanov, K. T., Gordienko, A. A., Plakhotich, I. S. The mathematical description of movement of the car with braking at the site of the first braking position of the hump yard under tail wind of small value [Matematicheskoe opisanie dvizhenija vagona s tormozheniem na uchastke

pervoj tormoznoj poziciji sortirovochnoj gorki pri vozdeystvii poputnogo vetra maloj velichiny]. *Transport Urala*, 2015, Iss. 4, pp. 10–15.

14. Turanov, K. T., Gordienko, A. A., Plakhotich, 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, December 2015, No. 4, pp. 57–62.

15. Turanov, K. T., Gordienko, A. A., Plakhotich, I. S. Example of calculation of speed of the car at the site of the first braking position of the hump yard with braking action under tail wind [Primer raschjota skorosti vagona na uchastke pervoj tormoznoj poziciji sortirovochnoj gorki s zaormozhivaniem pri vozdeystvii poputnogo vetra]. *Bulletin of transport information*, 2015, Iss. 12, pp. 24–29.

16. Turanov, K. T., Gordienko, A. A. Car movement at hump yard under tail wind. *World of Transport and Transportation*, Vol. 13, 2015, Iss. 6, pp. 36–48.

17. Appendix 3 to SMGS «Specifications Cargo Stowage and Securing» [Prilozhenie 3k SMGS «Tehnicheskie uslovija razmeshhenija i kreplenija gruzov»]. [Electronic resource] <http://osjd.org/doco/public/ru>. Last accessed 31.12.2015.

18. Rudanovsky, V. M. Determination of specific resistance to movement of cars on tracks with a variable slope [Ob opredelenii udel'nyh soprotivlenij dvizheniju vagonov na putjah s peremennym uklonom]. *Vestnik VNIIZhT*, 1969, Iss. 1, pp. 46–50.

19. Starshov, I. P. Determination of air resistance to movement of cars on hump yards [Opredelenie vozdušnogo soprotivlenija dvizheniju vagonov na sortirovochnykh gorkah]. *Vestnik VNIIZhT*, 1970, Iss. 6, pp. 16–20.

20. The resistance to movement of freight cars when rolling from humps [Soprotivlenie dvizheniju gruzovykh vagonov pri skatyvanii s gorok]. Ed. by E. A. Sotnikov. Moscow, Transport publ., 1975, 104 p.

21. Ustenko, A. B., Rudanovsky, V. M., Fonarev, N. M. Evaluation of reliability and efficiency of the systems of target speed control of cars on hump yards [Ocenka nadezhnosti i effektivnosti sistem pricefnogo regulirovanija skorosti dvizhenija vagonov na sortirovochnykh gorkah]. *Improving reliability of technical equipment at the stations: Collection of scientific works*. Moscow, Transport publ., 1984, pp. 21–35.

22. Kobzev, V. A., Schmal, V. A. Features of calculation of the sloping part of hump yards by drain by coordinate-wise descent method [Osobennosti raschjota spusknoj chasti sortirovochnykh gorok metodom pokoordinatnogo spuska]. *Nauka i tehnika transporta*, 2014, Iss. 1, pp. 17–20.

23. Loitsyansky, L. G., Lurie, A. I. Course of theoretical mechanics. Vol. II Dynamics [Kurs teoreticheskoy mehaniki. T. II. Dinamika]. Moscow, Nauka publ., 1983, 640 p.

24. Zemblin, S. V., Strakovsky, I. I. Album of schemes of elements of stations and junctions [Al'bom shem elementov stancij i uzlov]. Moscow, MPS publ., 1963, 89 p.

25. Obratsov, V. N. Stations and junctions [Stancii i uzly]. Part II. Moscow, Transzheldorizdat publ., 1938, 492 p.

26. Kiryanov, D. V. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. St. Petersburg, BVH-Petersburg publ., 2012, 432 p. ●

Information about the authors:

Turanov, Khabibulla T. – D.Sc. (Eng.), professor of Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, Russia, khturanov@yandex.ru.

Gordienko, Andrey A. – Ph.D. (Eng.), teaching assistant at the department of Stations, junctions and cargo work of Ural State University of Railway Transport (USURT), Yekaterinburg, Russia, gordiii89@yandex.ru.

Article received 31.12.2015, accepted 16.05.2016.

