

УДК 656.21.001.2

**Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко, А. В. Мягкова****УТОЧНЁННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ И СКОРОСТИ ВАГОНА НА ВТОРОМ СКОРОСТНОМ УЧАСТКЕ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОПУТНОГО ВЕТРА**

Дата поступления: 14.12.2016

Решение о публикации: 09.02.2016

**Цель:** Исследовать вычисления ускорения вагона и найти время движения и скорость вагона на втором скоростном участке горки до и после стрелочного перевода при воздействии попутного ветра. **Методы:** Вычисления ускорения вагона основаны на принципе Даламбера, а вычисления времени движения и скорости вагона – на широко известные из курса элементарной физики формулах пути и скорости при равноускоренном движении тела. **Результаты:** Исследованы силовые соотношения на втором скоростном участке горки при воздействии попутного ветра малой величины. Найдены конкретные значения проекции силы тяжести вагона с грузом и силы сопротивления ветра на направления скатывания вагона как сдвигающих сил. Вычислены силы трения качения колёс и силы трения скольжения гребней колёс с учётом воздействия на вагон сопротивлений всякого рода (среды, стрелки, кривых) и проекции силы ветра на боковую поверхность вагона до и после стрелки. Рассчитана величина силы трения скольжения гребней колёс при вхождении вагона в кривой участок пути после стрелочного перевода как удерживающих сил. На основе этих силовых соотношений с учётом инерции вращающихся масс вычислены конкретные значения ускорения вагона при различных видах сопротивления движению вагона до и после стрелки. По заданной величине скорости входа вагона на второй скоростной участок горки и вычисленному значению ускорения вагона выполнен расчёт времени движения и скорости вагона на данном участке горки. Построены графические зависимости времени движения от длины исследуемого участка горки и скорости скатывания вагона от времени. **Практическая значимость:** По результатам исследования можно разработать программу расчётов ускорения, времени движения и скорости скатывания вагона при воздействии ветров различных направлений, которые позволяют выполнить расчёт и проектирование всей длины сортировочной горки.

Сортировочная горка, вагон, попутный ветер, движение вагона, ускорение, второй скоростной участок горки, стрелочный перевод.

\***Khabibulla T. Turanov**, Dr. Sci. (Eng.), professor, khturanov@yandex.ru; **Andrey A. Gordiyenko**, Cand. Sci. (Eng.), teaching assistant, gordiii89@yandex.ru; **Alyona V. Myagkova**, assistant lecturer, myagkova0502@gmail.ru (Ural State University of Railway Transport) IMPROVED RESULTS OF CALCULATIONS OF MOVEMENT TIME AND SPEED OF A WAGON ON SECOND SPEED SECTION OF GRAVITY HUMPS UNDER THE INFLUENCE OF REAR WIND

**Objective:** To study calculations of wagon acceleration, and to find movement time and wagon speed on the second speed section of a gravity hump before and after railroad switch under the influence of rear wind. **Methods:** Calculations of wagon acceleration are based on the d'Alembert principle, and calculations of movement time and wagon speed are based on route and speed formulae for uniformly accelerated motion, widely known from elementary physics course. **Results:** Force correlations are studied for second speed section of a gravity wagon hump under the influence of low-intensity rear wind. Concrete values of projections of gravity force of a loaded wagon and of wind resistance force on

directions of wagon loading as shearing forces are established. Calculated are wheels' forces of rolling friction and wheel flanges' sliding friction forces, taking into account influences of resistances of various types (environment, switch, curves) and projection of wind force on wagon's side surface before and after the switch. The value of wheel flanges' sliding friction force upon wagon's entrance into a curve track under railroad switch is calculated as restraining forces. On the basis of these force correlations, taking into account rotating mass inertia, concrete values of wagon acceleration are calculated under various types of resistance to wagon movement before and after a switch. From the set value of a wagon's velocity at entry into second speed section of the gravity hump and from calculated value of wagon acceleration, calculation of the movement time and speed of a wagon at this section of the gravity hump is carried out. Characteristic curves of movement time from the length of gravity hump section under study and of wagon rolling speed from time are presented. **Practical importance:** Study results allow for development of a programme for calculation of acceleration, movement time and wagon rolling speed under the influence of winds from different directions, allowing calculating and designing the entire length of gravity hump.

Gravity hump, wagon, rear wind, wagon movement, acceleration, second speed section of a gravity hump, railroad switch.

Математические модели движения вагона на скоростных участках сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины, изложенные в [12, 13] в упрощённой постановке задачи, имели некоторые неточности представления диаграммы скорости попутного ветра и скорости движения вагона по уклону горки. Помимо этого, в [12, 13] сопротивления всякого рода (среды, стрелки, кривых) фактически учтены при движении вагона на всей длине второго скоростного участка (СК2) горки, т. е. до и после стрелочного перевода, хотя на втором скоростном участке горки до стрелочного перевода следовало бы учитывать только сопротивление среды, а после стрелочного перевода – сопротивления всякого рода. В [14] приведены примеры расчёта времени движения и скорости вагона с использованием аналитических формул [12].

В настоящей статье на основе данных [16] движение вагона на участке СК2 горки при воздействии попутного ветра разделено на два этапа: на первом вагон движется до стрелочного перевода (до стрелки), на втором – после стрелки по кривому участку пути. Исследователи еще не определили время движения и скорость скатывания вагона ни на первом, ни на втором этапе движения вагона на СК2 горки при воздействии попутного ветра малой величины.

Наша статья продолжает серию работ [1, 4, 8–17] о динамике скатывания вагона с сортировочной горки. Особо оговоримся, что в ней активно будут использованы основные подходы и результаты работы [16].

Цель статьи – на основе силовых соотношений в системе вагон – путь на СК2 горки при воздействии проекции попутного ветра малой величины вычислить ускорение вагона при его движении по кривому участку пути; далее, используя формулы пути и скорости движения тела, известные из курса элементарной физики, определить время и скорость скатывания вагона при его движении на каждом этапе СК2 горки.

### Формулировка задачи

Требуется получить конкретный пример расчёта ускорения, времени и скорости вагона при его движении на каждом этапе СК2 горки по упрощённой методике, где по найденному на основе силовых соотношений значению ускорения вагона при движении на участке СК2 горки  $a_k$  и известной величине этого участка горки  $l_j = x(t_k)$  можно было бы определить время  $t_k$ , в течение которого вагон движется с заданной начальной скоростью  $v_{0k}$  до и после стрелочного перевода этого участка горки, а по величине времени  $t_k$  – скорость

вагона  $v_{ek}(t_k)$ . Здесь и далее при  $k = 2$  учитываются только сопротивление среды ( $F_{cp} = F_c$ ) и отсутствие воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона  $F_{rBy} = F_{rB.б}$  на СК2 горки до стрелки; при  $k = 21$  учитываются сопротивление среды  $F_{cp}$  и воздействие проекции ветра с боковой стороны вагона  $F_{rBy}$ ; при  $k = 2$  с – сопротивление всякого рода (среды, стрелки, кривых)  $F_c$  и отсутствие воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона  $F_{rBy}$  на СК2 горки после стрелки;  $k = 21$  с – сопротивление всякого рода  $F_c$  и воздействие проекции ветра с боковой стороны вагона  $F_{rBy}$ ;  $k = 22$  с – одновременно сопротивление всякого рода  $F_c$ , воздействие поперечной переносной силы инерции  $I_{ey}$  и проекции ветра с боковой стороны вагона  $F_{rBy}$ . Здесь и далее  $j = 2$  соответствует случаю, когда  $k = 2; 21, a$   $j = 2$  с –  $k = 2$  с;  $21$  с;  $22$  с.

### Общий подход к решению задачи при движении вагона на втором скоростном участке горки

При решении задачи движения вагона с сортировочной горки, как и в [12, 14, 16], использовано классическое положение теоретической механики – основной принцип Даламбера в координатной форме [5] и известные из курса элементарной физики классические формулы пути и скорости движения тела.

В условиях задачи и принятых предположениях рассмотрен случай, когда вагон по уклону сортировочной горки входит на СК2 горки с заданной начальной скоростью  $v_{0k}$ . При входе одиночного вагона на рассматриваемый участок горки считаем, что вагон будет испытывать воздействие в основном внешних сил в виде силы тяжести вагона с грузом  $G$ , проекции силы аэродинамического сопротивления попутного ветра малой величины (например, юго-западного направления)  $F_{rB}$  по продольной оси  $Ox$  и поперечной оси  $Oy$  в виде  $F_{rBx}$  и  $F_{rBy}$ , при этом оси  $Ox$  и  $Oy$  ортогональны в плоскости движения вагона (рис. 1), удельное

давление на  $1 \text{ м}^2$  площади вагона с грузом равно  $0,5 \text{ кН/м}^2$  [7].

Также будем считать, что на вагон будут воздействовать силы трения качения колёс о поверхности катания рельсовых нитей  $F_{тр.к}$  и трения скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити  $F_{тр.ск}$ , учитывая воздействие поперечной переносной силы инерции  $I_{ey}$  и проекции ветра с боковой стороны вагона  $F_{rBy}$ .

При формировании расчётной модели движения вагона на СК2 горки до стрелки принято, что колёсные пары по рельсовым нитям катятся при чистом качении колёс относительно поверхности катания рельсовых нитей  $F_{тр.к}$  и трении скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити  $F_{тр.ск}$ , которое появляется при учёте воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона  $F_{rBy}$ , т. е.  $F_{тр.к} = F_{тр.к} + F_{тр.ск}$ . При движении вагона по кривому участку пути после стрелки следует учесть трение скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити  $F_{тр.ск}$ ,

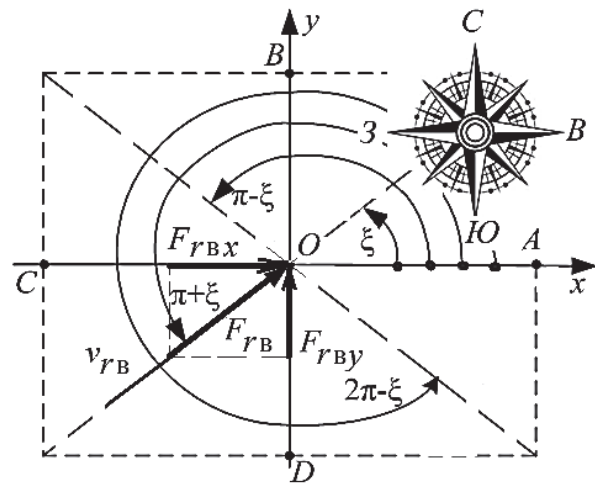


Рис. 1. Диаграмма попутного ветра юго-западного направления:

$\bar{v}_{rB}$  – абсолютная скорость попутного ветра;  
 $\pi + \xi$  – направляющий угол вектора абсолютной скорости ветра  $\bar{v}_{rB}$  относительно горизонтали (ось  $Ox$ ), например для юго-западного направления ветра;  $\bar{F}_{rB}$  – сила воздействия попутного ветра;  $F_{rBx}$  и  $F_{rBy}$  – проекции силы воздействия  $\bar{F}_{rB}$  попутного ветра на оси  $Ox$  и  $Oy$ , т. е.  $(\bar{F}_{rBx}, \bar{F}_{rBy}) \in \bar{F}_{rB}$

которое появляется при учёте воздействия поперечной переносной силы инерции  $I_{ey}$  и проекции силы  $F_{rby}$  на направление последней силы.

Этим условиям соответствует упрощённая расчётная модель движения вагона на участке СК2 горки, полученная с использованием принципа освобождения от связей [5] (рис. 2).

Упрощённая последовательность построения математической модели движения вагона на СК2 горки базируется на основном законе динамики для переносного движения вагона с неидеальной связью (принципе Даламбера) в координатной форме [5], который на основе силовых соотношений позволяет вычислить ускорение вагона при движении на СК2 горки  $a_k$ .

Таким образом, используя основной принцип Даламбера по силовым соотношениям, найдем ускорение вагона при движении на СК2 горки  $a_k$ , а затем по известной величине второго скоростного участка горки  $l_j = x(t_k) -$

время  $t_k$ , в течение которого вагон движется с заданной начальной скоростью  $v_{0k}$  до начала стрелочного перевода этого участка горки, а по времени  $t_k$  – скорость вагона  $v_{ek}(t_k)$ . Аналогично определяется время движения  $t_{kc}$  и скорость вагона  $v_{ekc}(t_{kc})$  после стрелки до начала первой тормозной позиции.

### Упрощённая последовательность расчёта времени и скорости вагона при его движении на втором скоростном участке горки

Скорость вагона на СК2 сортировочной горки при движении вагона на первом и втором этапах движения при воздействии попутного ветра вычисляют в такой последовательности.

1) При проектировании сортировочной горки полную длину СК2 горки  $l_j$  принимают согласно рекомендациям [2]. Например,

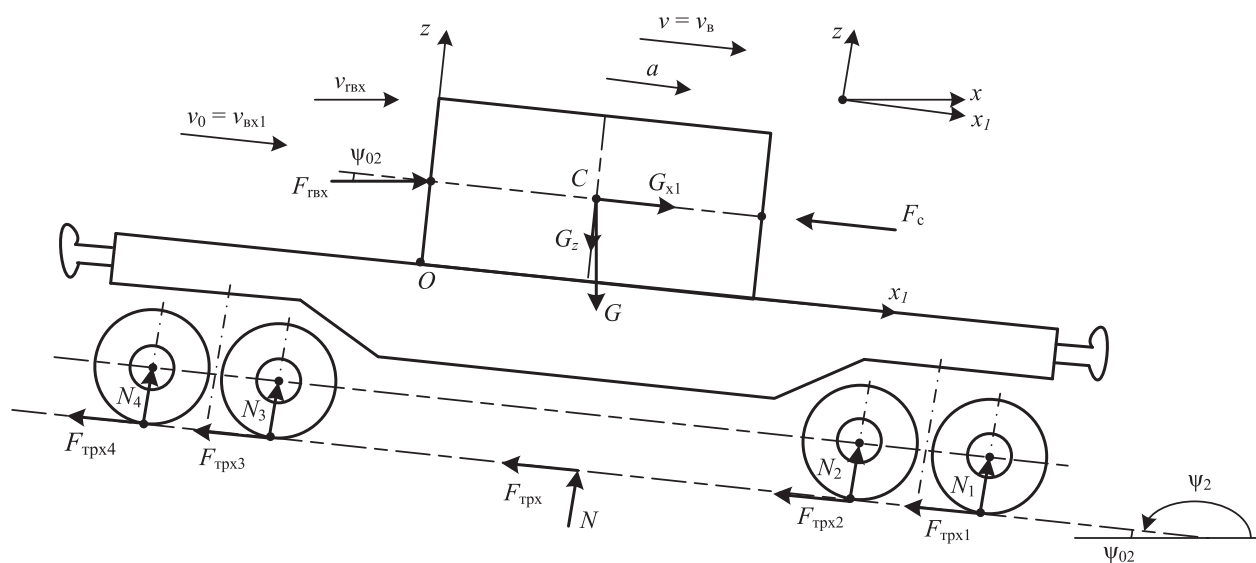


Рис. 2. Упрощённая расчётная модель движения вагона на участке СК2 при воздействии попутного ветра:

$O$  – начало подвижной системы координат  $Ox_1yz$ , жёстко связанной с вагоном;  $Ox_1$  – ось по горизонтали;  $\psi_{02}$  – угол уклона (спуска) участка СК2 горки;  $v_{ГВХ}$  – относительная скорость воздуха;  $v_0 = v_{вх1}$  – начальная скорость вагона;  $v_B$  – скорость вагона;  $G$ ,  $G_{x1}$ ,  $G_z$  – сила тяжести вагона с грузом и её проекции на оси  $Ox_1$  и  $Oz$ , соответственно;  $F_c = F_{cp}$  – сила сопротивления среды до стрелки, 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  $F_{тр.x} = F_{трx1} + F_{трx2} + F_{трx3} + F_{трx4}$  как параллельные силы

если уклон горки 30%,  $\psi_{02} = 0,03$  рад. ( $\text{tg}\psi_{02} = 0,03$ ), то длина рассматриваемого участка до стрелки  $l_2 \approx 15$  м, а после стрелки –  $l_{2c} = 18,63$  м. При этом угол поворота кривых на СК2 горки  $\alpha_2$  принимают в зависимости от количества пути на горочной горловине, например, если горочная горловина спроектирована на 24-м или 32-м пути, то  $\alpha_2 = 4,73^\circ = 0,083$  рад., а если на 40-м пути, то  $\alpha_2 = 2,73^\circ = 0,048$  рад.

2) Подсчитывают проекции силы воздействия попутного ветра на вагон  $F_{рв}$ , например юго-западного направления, по продольной  $Ox$  и поперечной  $Oy_1$  оси (на рис. 2 ось  $Oy_1$  не показана) в виде (см. (2) [16]), кН:

$$F_{рвх} = 0,5A_T; F_{рвб} = 0,5A_6,$$

где 0,5 – удельное давление на 1 м<sup>2</sup> площади, кН/м<sup>2</sup> [7];  $A_T$  – площадь торцевой поверхности вагона с грузом, м<sup>2</sup>;  $A_6$  – площадь боковой поверхности вагона с грузом, м<sup>2</sup>. Например, если  $A_T = 6,384$  и  $A_6 = 27,36$  м<sup>2</sup>, то  $F_{рвх} = 3,192$  и  $F_{рвб} = 13,68$  кН.

3) Рассчитывают сдвигающую силу  $F_{сдх1}$ , т. е. проекции силы тяжести вагона с грузом  $G_{x1}$  и силы сопротивления попутного ветра  $F_{рвх}$  на направление скатывания вагона по оси  $Ox_1$  (см. рис. 2 и (3) [16]):

$$F_{сдх1} = G \sin(\psi_{0k}) + F_{рвх} \cos(\psi_{0k}), \quad (1)$$

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

Например, независимо от значения  $k = 2$  или 2 с, если  $G = 908$  кН;  $\sin(\psi_{02}) = 0,03$ ,  $F_{рвх} = 3,192$  кН,  $\cos(\psi_{02}) = 1$ , то  $F_{сдх1} = 30,426$  кН.

4) Вычисляют силу трения качения  $F_{тр.к}$  от проекций 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)  $F_\tau$ , которая, согласно закону Кулона, равна (см. (7) [16])

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

где  $f_0$  – некоторый приведённый коэффициент трения качения, учитывающий количество колёс в тележках, трения качения (по кольцам подшипника и колеса по рельсу) (обычно принимают  $f_0 = 0,0001$ ) [2–14, 16, 17]. Например, независимо от значения  $k = 2$  или 2 с, если  $f_0 = 0,0001$ ,  $G = 908$  кН – сила тяжести вагона с грузом с учётом инерции вращающихся масс (колёсных пар)<sup>1</sup>,  $\cos(\psi_{02}) = 1$ ,  $F_{рвх} = 3,192$  кН,  $\sin(\psi_{02}) = 0,03$ , то  $F_{тр.к1} = F_{тр.к} = 0,094$  кН.

5) Вычисляют силу трения скольжения  $F_{тр.ск}$  от воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона  $F_{рву} = F_{рвб}$  как касательную составляющую реакции связи (рельсовых нитей)  $F_\tau$ , которая, согласно закону Кулона, равна (см. (8) [14])

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

где  $f_{ск0}$  – коэффициент трения скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити (обычно принимают  $f_{ск0} = 0,25$ ). Например, если  $f_{ск0} = 0,25$ ,  $F_{рву} = F_{рвб} = 13,68$  кН, то  $F_{тр.бх} = F_{тр.ск} = 3,42$  кН.

6) С учётом (2) и (3) вычисляют силу трения вдоль движения вагона как сумму сил трения качения  $F_{тр.к}$  и сил трения скольжения  $F_{тр.ск}$  при учёте воздействия проекции ветра с боковой стороны вагона  $F_{рву}$  в виде

$$F_{трх1} = F_\tau = F_{тр.к} + F_{тр.ск}.$$

Например, если  $F_{тр.к} = 0,094$ ,  $F_{тр.ск} = 3,42$  кН, то  $F_{трх1} = 3,514$  кН.

7) Находят силы сопротивления движению вагона от среды  $F_{ср}$  в виде (см. (8) [16])

$$F_{ср} = k_{ср}k_{нв}G,$$

где  $k_{ср}$  – коэффициент, учитывающий долю силы тяжести  $G$  при учёте сопротивления сре-

<sup>1</sup> Без учёта этой инерции  $G = 794$  кН при силе тяжести груза  $G_{гр} = 650$  кН.

ды (обычно в пределах 0,0001–0,0005 при скорости попутного ветра 2–4 м/с) [16];  $k_{\text{нв}}$  – коэффициент, учитывающий неточность вычислений  $k_{\text{сп}}$  (обычно принимают до 1,5). Например, если  $k_{\text{сп}} = 0,0003$ ,  $k_{\text{нв}} = 1,45$  и  $G = 908$  кН, то  $F_{\text{сп}} = 0,395$  кН.

8) Вычисляют удерживающие силы  $F_{\text{удк.х1}}$ , оказывающие сопротивление движению вагона на СК2 горки до и после стрелочного перевода в виде (см. (10 а) [16])

$$F_{\text{удк.х1}} = F_{\text{тр.к}} + F_{\text{сп}} + F_{\text{тр.кк}} \quad (4)$$

или (см. (10) [16])

$$F_{\text{удк.х1}} = f_0(G \cos(\psi_{0k}) + F_{\text{рвх}} \sin(\psi_{0k})) + (k_{\text{сп}} + k_{\text{стр}} + k_{\text{кр}})G + f_{\text{ск0}} F_{\text{рвб}} \cos(\alpha_2), \quad (5)$$

где  $\alpha_2$  – угол поворота кривых на СК2 горки (обычно принимают 0,083 рад.).

В (5)  $k_{\text{стр}}$ , и  $k_{\text{кр}}$  – коэффициенты, учитывающие долю силы тяжести  $G$  при учёте сопротивления стрелки, кривых (обычно принимают  $k_{\text{стр}} = 0,00025$ ,  $k_{\text{кр}} = 0,000066$ ) [6].

Например, при вычислении  $F_{\text{удк.х1}}$  по (4): если  $F_{\text{тр.к}} = 0,094$  кН (по (2)),  $F_{\text{сп}} = 0,227$  кН,  $F_{\text{рвх}} = 13,68$  кН,  $F_{\text{трб.х}} = F_{\text{трб.к}} = 3,42$  кН (по (3)), то  $F_{\text{уд2х1}} = 0,321$  кН,  $F_{\text{уд21х1}} = 3,741$  кН. При вычислении  $F_{\text{удк.х1}}$  по (5)  $F_{\text{с}} = 2,557$  кН (при  $k_{\text{сп}} + k_{\text{стр}} + k_{\text{кр}} = 0,0028$ ),  $F_{\text{уд2сх1}} = 2,651$  кН,  $F_{\text{уд21сх1}} = 6,059$  кН.

9) По величине сдвигающей  $F_{\text{сдх1}}$  и удерживающей  $F_{\text{удк.х1}}$  сил вычисляют силу  $F_k$ , способствующую движению вагона на СК2 до и после стрелочного перевода (см. (11) [14]), кН [17]:

$$F_k = F_{\text{сдх1}} - F_{\text{удк.х1}}.$$

Например, если  $F_{\text{сдх1}} = 30,426$  кН,  $F_{\text{уд2х1}} = 0,321$  кН,  $F_{\text{уд21х1}} = 3,741$  кН, то значения сил  $F_k$  при  $k = 2$ ; 21 имеют значения  $F_2 = 30,1$  кН,

$F_{21} = 26,685$  кН, то значения сил  $F_k$  при  $k = 2$ ; 21 составляет:  $F_2 = 30,1$  кН,  $F_{21} = 26,685$  кН.

После стрелочного перевода, если  $F_{\text{сдх1}} = 30,426$  кН,  $F_{\text{уд2сх1}} = 2,651$ ,  $F_{\text{уд21сх1}} = 6,059$  кН, то значения сил  $F_k$  при  $k = 2$  с; 21 с таковы:  $F_{2с} = 27,775$  кН,  $F_{21с} = 24,367$  кН.

10) По значению силы  $F_k$  и массы вагона  $M$  с учётом инерции вращающихся частей на основе силовых соотношений (принципа Даламбера) находят ускорение вагона  $a_k$  при движении на рассматриваемом участке горки с ускорением, м/с<sup>2</sup> (см. (14) [16]):

$$a_k = \frac{F_k \cdot 10^3}{M}.$$

Например, если  $M = 5,484 \cdot 10^4$  кг – масса вагона с грузом с учётом инерции вращающихся частей вагона и  $F_2 = 30,1$  кН,  $F_{21} = 26,685$  кН,  $F_{2с} = 27,775$  кН,  $F_{21с} = 24,367$  кН, то ускорение вагона при  $k = 2$ ; 21 равно:  $a_2 = 0,325$  м/с<sup>2</sup>,  $a_{21} = 0,288$  м/с<sup>2</sup>, а при  $k = 2$  с, 21 с  $a_{2с} = 0,3$  м/с<sup>2</sup>,  $a_{21с} = 0,263$  м/с<sup>2</sup>.

Отсюда ясно, что независимо от того, движется вагон до или после стрелки при воздействии сопротивлений всякого рода (среды, стрелки, кривых)  $F_c$ , проекции попутного ветра на боковую сторону вагона  $F_{\text{рвх}}$ , происходит его равноускоренное движение.

11) На основе классической формулы пути элементарной физики вычисляют время  $t_k$ , с, в течение которого происходит прямолинейное равноускоренное движение вагона на СК2 горки длиной  $l_j$ , м, (см. (16) [16]):

$$t_k(l_j) = f(v_{0k}, a_k, l_j),$$

где  $v_{0k}$  – начальная скорость вагона (скорость входа вагона на СК2 горки), м/с. Например, по данным расчётов предыдущих участков горки при  $k = 2$ ; 21 пусть  $v_{02} = 6,647$  м/с,  $v_{021} = 6,439$  м/с, а при  $k = 2$  с; 21 с  $v_{02с} = 7,341$  м/с,  $v_{021с} = 7,075$  м/с.

Например, если  $v_{02} = 6,647$  м/с,  $v_{021} = 6,439$  м/с,  $a_2 = 0,325$  м/с<sup>2</sup>,  $a_{21} = 0,288$  м/с<sup>2</sup>,  $l_2 = 15,007$  м, то при  $k = 2$ ; 21 время, в течение которого вагон скатывается на СК2 гор-

ки до стрелки,  $t_2 = 2,146$  с,  $t_{21} = 2,22$  с; а при  $k = 2$  с;  $21$  с если  $v_{02c} = 7,341$  м/с,  $v_{021c} = 7,075$  м/с,  $a_{2c} = 0,3$  м/с<sup>2</sup>,  $a_{21c} = 0,263$  м/с<sup>2</sup>,  $l_{2c} = 18,638$  м, то время, в течение которого вагон скатывается на СК2 горки после стрелки,  $t_{2c} = 2,418$  с,  $t_{21c} = 2,515$  с.

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

12) На основе классической формулы скорости элементарной физики определяют скорость вагона на участке СК2 горки до и после стрелки  $v_k$  по классической формуле элементарной физики:

$$v_k = f(v_{0k}, a_k, t_k).$$

Например, для заданных исходных данных  $v_{02} = 6,647$  м/с,  $v_{021} = 6,439$  м/с,  $a_2 = 0,325$  м/с<sup>2</sup>,  $a_{21} = 0,288$  м/с<sup>2</sup>,  $t_2 = 2,145$  с,  $t_{21} = 2,22$  с; при  $k = 2$ ;  $21$  скорость вагона на СК2 горки до стрелочного перевода  $v(t_2) = 7,345$  м/с (26,4 км/ч),  $v(t_{21}) = 7,08$  м/с (25,5 км/ч), а после стрелочного перевода при  $k = 2$  с;  $21$  с, если  $v_{02c} = 7,341$  м/с,  $v_{021c} = 7,075$  м/с,  $a_{2c} = 0,263$  м/с<sup>2</sup>,  $a_{21c} = 0,225$  м/с<sup>2</sup>,  $t_{2c} = 2,418$  с,  $t_{21c} = 2,515$  с, то  $v(t_{2c}) = 8,07$  м/с (29,0 км/ч),  $v(t_{21c}) = 7,74$  м/с (27,87 км/ч).

### Построение графических зависимостей времени и скорости скатывания вагона при его движении на втором скоростном участке горки

Приведём макет-документ, полученный в программе MathCAD [3]. Для примера покажем графические зависимости времени движения от вариации длины пройденного пути и скорости скатывания вагона на СК2 горки в любой момент времени  $t$  до стрелки (рис. 3, 4).  $l_2 = 0,1-15$  – изменение пути прохождения вагона  $l_k$  СК2 горки до стрелки, м.

Время движения вагона  $t_k(l_j)$ , с, при вариации длины рассматриваемого участка сортировочной горки  $l_j$  под воздействием проекции ветра на торцевую сторону вагона  $F_{рвх}$  с

учетом сопротивления среды  $F_{cp}$ , а также при воздействии  $F_{рвх}$  с учетом одновременного воздействия  $F_{cp}$  и проекции попутного ветра на боковую сторону вагона  $F_{рбу}$  до стрелки (т.е. при  $j = 2$ , чему соответствуют  $k = 2$ ;  $21$ ) можно представить так, как показано на рис. 3.

Графические зависимости времени движения от вариации длины пройденного пути  $l_j$  после стрелки при  $k = 2$  с;  $21$  с имеют вид, как на рис. 3.

$t = 0, 0,1-2,1$  – изменение времени движения вагона  $t$  на СК2 горки, с.

Скорость скатывания вагона на СК2 горки в любой момент времени  $t$  равноускоренного движения вагона до стрелки при воздействии проекции ветра на торцевую сторону вагона  $F_{рвх}$  с учётом сопротивления среды  $F_{cp}$ , а также при воздействии  $F_{рвх}$  с учётом одновременного воздействия  $F_{cp}$  и проекции попутного ветра на боковую сторону вагона  $F_{рбу}$  (т.е. при  $j = 2$ , чему соответствуют  $k = 2$ ;  $21$ ) можно представить графически (рис. 4).

Характер кривых скорости скатывания вагона на СК2 горки в любой момент времени  $t$  равноускоренного движения вагона после стрелки при воздействии проекции ветра на торцевую сторону вагона  $F_{рвх}$  с учётом сопротивлений всякого рода  $F_c$ , а также при воздействии  $F_{рвх}$  с учётом одновременного воздействия  $F_c$  и проекции попутного ветра на боковую сторону вагона  $F_{рбу}$  при  $k = 2$  с;  $21$  с такой же, как на рис. 4.

Обобщая результаты исследований на примере учёта воздействия проекции ветра на торцевую сторону вагона  $F_{рвх}$  с учетом сопротивления среды  $F_{cp}$ , а также при воздействии  $F_{рвх}$  с учетом одновременного воздействия  $F_{cp}$  и проекции попутного ветра на боковую сторону вагона  $F_{рбу}$ , можно отметить, что если время движения вагона до стрелки, например, при  $k = 2$ ,  $t_2 = 2,146$  с и его скорость  $v(t_2) = 7,345$  м/с, или 26,4 км/ч, то эти данные после стрелки, например, при  $k = 2$  с, равны  $t_{2c} = 2,418$  с, его скорость  $v(t_{2c}) = 8,07$  м/с, или 29,0 км/ч. С учётом воздействия проекции ветра на торцевую сторону вагона  $F_{рвх}$  с учетом сопротивлений всякого рода  $F_c$ , а также при

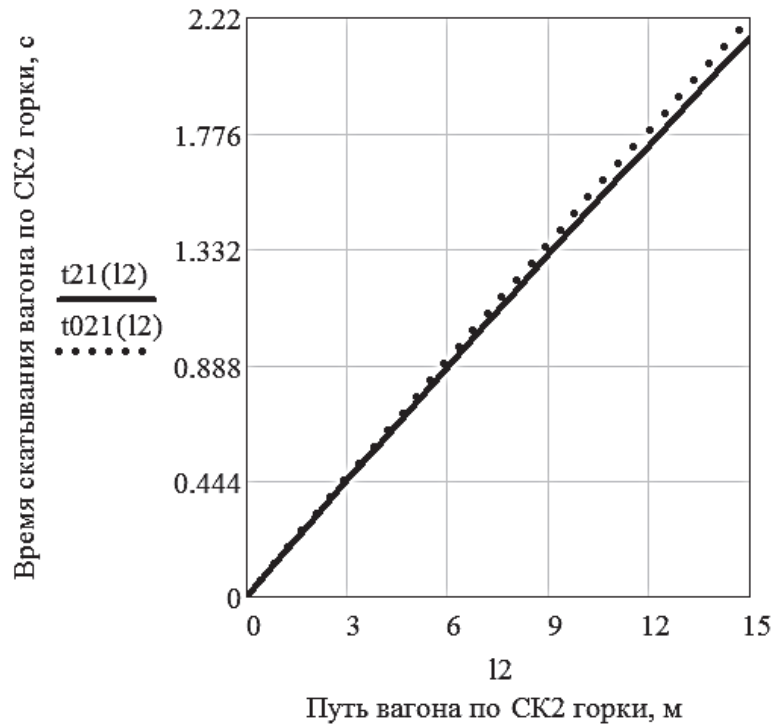


Рис. 3. Графическая зависимость времени движения вагона на втором скоростном участке горки до стрелки

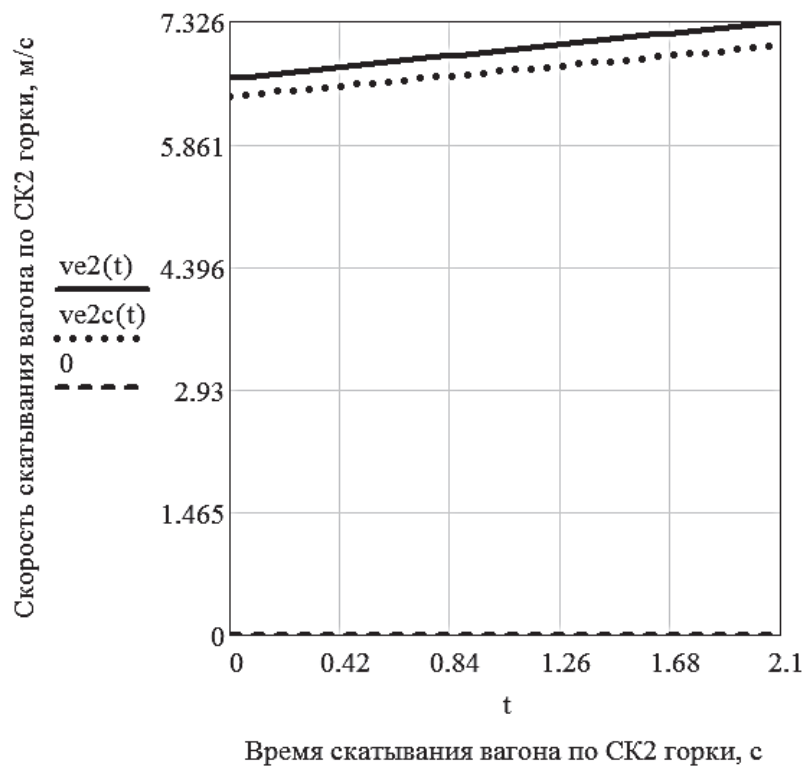


Рис. 4. Графическая зависимость скорости скатывания вагона на втором скоростном участке горки до стрелки



воздействии  $F_{\text{рвх}}$  с учетом одновременного воздействия  $F_c$  и проекции попутного ветра на боковую сторону вагона  $F_{\text{рвп}}$ , время движения и скорость скатывания вагона после стрелки также увеличиваются (например, при  $k = 21$ ,  $t_{21} = 2,22$  с, его скорость  $v(t_{21}) = 7,08$  м/с, или 25,5 км/ч; при  $k = 21$  с  $t_{21\text{с}} = 2,515$  с, его скорость  $v(t_{21\text{с}}) = 7,74$  м/с, или 27,87 км/ч).

## Выводы

Ранее построенные нами математические модели движения вагона на участке СК2 горки при воздействии проекции попутного ветра малой величины, полученные нами в упрощенной постановке задачи [16], позволили разработать последовательность расчёта ускорения, время движения и скорость скатывания вагона при заданной длине рассматриваемого участка.

Данные подсчётов по определению ускорения, времени движения и скорости скатывания вагона по упрощенной методике позволили по известной величине пройденного расстояния вагона на втором скоростном участке горки до и после стрелки  $l_j$  определить время движения вагона  $t_k$  при различных условиях (воздействии только сопротивлений всякого рода, ветра с боковой стороны вагона и др.). Конкретные значения  $t_k$  позволили найти скорости скатывания вагона в конце рассматриваемого участка горки до и после стрелки  $v_k(t_k)$ .

Результаты выполненных исследований могут быть использованы для уточнённого расчета и проектирования первой тормозной позиции сортировочной горки.

## Библиографический список

1. Долженко А. М. Оптимальное управление ро-спуском поездов на сортировочных горках малой мощности / А. М. Долженко // Вестн. транспорта Поволжья. – 2014. – № 1 (43). – С. 62–66.
2. Земблинов С. В. Альбом схем элементов стан-ций и узлов / С. В. Земблинов, И. И. Страковский. – М. : Всесоюз. изд.-полиграфич. объединение МПС, 1963. – 89 с.
3. Кирьянов Д. В. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0 / Д. В. Кирьянов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
4. Кобзев В. А. Особенности расчёта спускной части сортировочных горок методом покоординатного спуска / В. А. Кобзев, С. Н. Шмаль // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 1. – С. 17–20.
5. Лойцянский Л. Г. Курс теоретической меха-ники. Т. II. Динамика / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лу-рье. – М. : Наука, 1983. – 640 с.
6. Образцов В. Н. Станции и узлы. Ч. II / В. Н. Об-разцов. – М. : Трансжелдориздат, 1938. – 492 с.
7. Приложение 3 к СМГС «Технические усло-вия размещения и крепления грузов». – URL : <http://osjd.org/doco/public/ru>.
8. Рудановский В. М. Влияние погрешностей АРС на образование «окон» и скорость соударе-ния отцепов в подгорочном парке / В. М. Руданов-ский // Вестн. ВНИИЖТ. – 1977. – № 3. – С. 47–50.
9. Рудановский В. М. Об определении удель-ных сопротивлений движению вагонов на путях с переменным уклоном / В. М. Рудановский // Вестн. ВНИИЖТ. – 1969. – № 1. – С. 46–50.
10. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / под ред. Е. А. Сотнико-ва. – М. : Транспорт, 1975. – 104 с. (Труды «Вестн. ВНИИЖТ». Вып. 545.)
11. Старшов И. П. Определение воздушного со-противления движению вагонов на сортировочных горках / И. П. Старшов // Вестн. ВНИИЖТ. – 1970. – № 6. – С. 16–20.
12. Туранов Х. Т. Аналитическое определение времени скатывания вагона на втором скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 2. – С. 73–81.
13. Туранов Х. Т. Математическая модель вре-мени скатывания вагона на первом скоростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Бюл. транспортной информа-ции. – 2015. – № 6 (240). – С. 17–23.
14. Туранов Х. Т. Пример расчёта времени и скорости скатывания вагона на втором ско-

ростном участке сортировочной горки при воздействии попутного ветра малой величины по новой методике / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 3. – С. 63–70.

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

16. Turanov Kh. Analytical Description of Wagon Motion on the Second Speed Section of the Marshalling Hump with Switch Zone under the Impact of Fair Wind / Kh. Turanov, A. Gordiienko, A. Myagkova // J. Multi. Eng. Sci. Technol. (JMEST). – 2015. – Vol. 2, Is. 11, Nov.

17. Turanov Kh. Analytical Determination of Conditions of Wagon Rolling Down Marshalling Hump Profiles / Kh. Turanov, A. Gordiienko. – Open Access Libr. J. – 2015. – no. 2, e1912. – P. 1–11. – DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101912>.

## References

1. Dolzhenko A. M. *Vestnik transporta Povolzhya – Volga Region Transport Bull.*, 2014, no. 1 (43), pp. 62-66.

2. Zemblinov S. V. & Strakovskiy I. I. *Album skhem elementov stantsiy i uzlov [Album of Schemes of Station and Junction Elements]*. Moscow, Vsesoyuznoye izdatel'sko-poligraficheskoye ob'yedineniye MPS, 1963. 89 p.

3. Kiryanov D. V. *Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0*. St. Petersburg, BKhV-Peterburg, 2012. 432 p.

4. Kobzev V. A. & Shmal S. N. *Nauka i tekhnika transporta – Transport Sci. and Eng.*, 2014, no. 1, pp. 17-20.

5. Loytsyanskiy L. G. & Lurye A. I. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki [Theoretical Mechanics*

*Course]*. Vol. II. Dynamics. Moscow, Nauka, 1983. 640 p.

6. Obraztsov V. N. *Stantsii i uzly [Stations and Junctions]*. Pt. II. Moscow, Transzheldorizdat, 1938. 492 p.

7. Appendix 3 to Agreement on International Railway Freight Traffic, “Technical Conditions for Cargo Positioning and Fastening”, available at: <http://osjd.org/doco/public/ru>.

8. Rudakovskiy V. M. *Vestnik VNIIZhT – Bulletin of the Railway Res. Institute*, 1977, no. 3, pp. 47-50.

9. Rudakovskiy V. M. *Vestnik VNIIZhT – Bulletin of the Railway Res. Institute*, 1969, no. 1, pp. 46-50.

10. Soprotivleniye dvizheniyu gruzovykh vagonov pri skatyanii s gorok [Resistance to Freight Wagon Movement in Rolling from Gravity Humps]; ed. Ye. A. Sotnikov. Moscow, Transport, 1975. 104 p. (Proc. of „*Vestnik VNIIZhT – Bulletin of the Railway Res. Institute*“, Is. 545.)

11. Starshov I. P. *Vestnik VNIIZhT – Bulletin of the Railway Res. Institute*, 1970, no 6, pp. 16-20.

12. Turanov Kh. T. & Gordiyenko A. A. *Nauka i tekhnika transporta – Transport Sci. and Eng.*, 2015, no. 2, pp. 73-81.

13. Turanov Kh. T. & Gordiyenko A. A. *Byulleten transportnoy informatsii – Transp. inf. bull.*, 2015, no. 6 (240), pp. 17-23.

14. Turanov Kh. T. & Gordiyenko A. A. *Nauka i tekhnika transporta – Transport Sci. and Eng.*, 2015, no. 3, pp. 63-70.

15. Ustenko A. B., Rudanovsky V. M. & Fonarev N. M. *Povysheniye nadezhnosti tekhnicheskikh sredstv na stantsiyakh: sbornik nauchnykh trudov – Improving Reliability of Technical Facilities at Stations: Coll. of Sci. Papers*. Moscow, Transport, 1984. Pp. 21-35.

16. Turanov Kh., Gordiienko A. & Myagkova A. *J. Multi. Eng. Sci. Technol. (JMEST)*, 2015, Vol. 2, Is. 11, Nov.

17. Turanov Kh. & Gordiienko A. *Open Access Libr. J.*, 2015, no. 2, e1912, pp. 1–11; DOI <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101912>.

\*ТУРАНОВ Хабибулла Туранович – д-р техн. наук, профессор, [khturanov@yandex.ru](mailto:khturanov@yandex.ru); ГОРДИЕНКО Андрей Александрович – канд. техн. наук, ассистент кафедры, [gordiii89@yandex.ru](mailto:gordiii89@yandex.ru); МЯГКОВА Алёна Валерьевна – ассистент, [myagkova0502@gmail.ru](mailto:myagkova0502@gmail.ru) (Уральский государственный университет путей сообщения).