

УДК 656.212.5

*К. И. КОРНИЕНКО*

*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск  
Kkonstantini@mail.ru*

## **ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОГО УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ВАГОНОВ В СОРТИРОВОЧНОМ ПАРКЕ С УЧЕТОМ ПЕРЕРАБАТЫВАЕМОГО ВАГОНПОТОКА И ОТЦЕПОПОТОКА**

Рассматривается влияние распределения температуры наружного воздуха, направления, силы и порывистости ветра, скорости движения отцепа на различных участках сортировочной горки на кривую распределения суммарного удельного сопротивления движению вагонов в сортировочном парке. Для исследования использовалась разработанная имитационная модель заполнения пути сортировочного парка. В результате исследований была построена кривая распределения суммарного удельного сопротивления с учетом перерабатываемого вагонопотока и отцепопотока и с учетом распределения скорости движения отцепа на пути сортировочного парка.

**Введение.** В данной статье рассматриваются сопротивления от снега и инея, сопротивление от воздушной среды и суммарное удельное сопротивление [1]. Цель данной статьи заключается в построении кривой распределения суммарного удельного сопротивления с учетом перерабатываемого вагонопотока и отцепопотока, а также распределения скорости движения отцепа на пути сортировочного парка.

**Описание эксперимента.** Для построения кривых распределения использовалась имитационная модель заполнения путей сортировочного парка [2–4]. Для этого производился прогон модели со случайным распределением параметров. Количество прогонов было равно  $10^5$ , в результате чего была достигнута высокая точность полученных результатов. Профиль парка приведен на рисунке 1 [5].

Вагонопоток задавался как случайное распределение согласно [1, таблица 4]. В качестве допущения было принято условие, что все вагоны являются крытыми 4-осными с площадью поперечного сечения равной  $9,7 \text{ м}^2$ . Максимальное количество вагонов в отцепе равно 6.

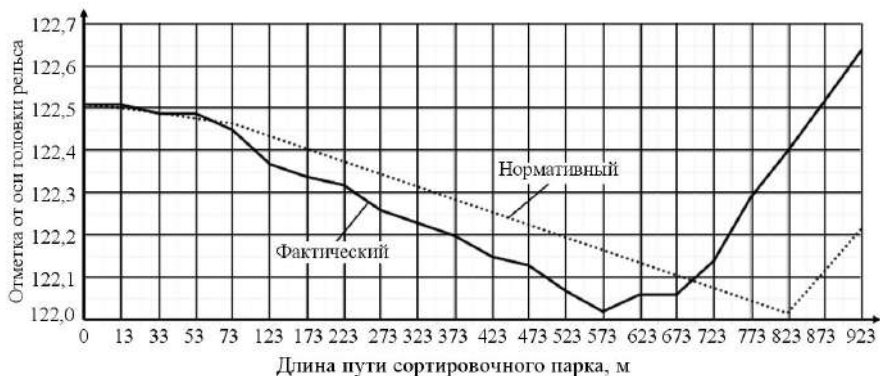


Рисунок 1 – Профиль пути сортировочного парка

Распределение температуры наружного воздуха задавалось по следующей формуле [6–13]:

$$f(t) = \frac{1}{12\sqrt{2\pi}} \sum_{T=1}^{12} \frac{\exp\left[-\frac{(t - m_{iT})^2}{2\sigma_{iT}^2}\right]}{\sigma_{iT}} \quad (1)$$

где  $T$  – порядковый номер месяца в году;  $m_{iT}$  – средняя температура воздуха в  $T$ -й месяц, °С;  $\sigma_{iT}$  – среднеквадратичное отклонение температуры наружного воздуха в  $T$ -й месяц, °С;  $t$  – температура окружающего воздуха, °С.

Экспериментальные данные для среднего значения и среднеквадратичное отклонение наружного воздуха были получены из справочника климата для Новосибирска [14].

Направление и скорость ветра задавались также по справочнику [14] с учетом поправки между направлением оси пути и северным направлением ветра. Каждое моделирование выполнялось при случайных условиях. Вероятность появления скорости и направления ветра задавалось табличным способом. Распределение в указанных интервалах подчинялось равномерному закону распределения.

Особые условия моделирования:

- расчетная скорость подхода отцепа к стоящим вагонам равна 0,75 м/с;
- интервал между отцепами равен 10 минутам;
- при моделировании движения отцепа принимается во внимание пульсация ветра, которая вносит дополнительный случайный разброс параметров [18–19]. Однако в данном исследовании пульсация ветра принималась равной нулю;
- моделирование производилось с помощью шарнирно-осевой модели движения с шагом 1 м;

– после каждого шага моделирования в таблицы заносилась информация о сопротивлении от среды и ветра и суммарном удельном сопротивлении. Кривые строились на основании данных таблиц.

**Сопротивление от снега и инея** учитывается при расчете высоты сортировочной горки при неблагоприятных условиях. Расчет ведется для проверки возможности докатывания плохого бегуна для расчетной точки. Данное сопротивление учитывается только в пределах стрелочной зоны и сортировочного парка. Сопротивление от снега и инея задается дискретными значениями, определяемыми по весовой категории отцепа и температуре окружающего воздуха [24–25]. Значения, применяемые для расчета, представлены в [25, таблица 4.5].

В [26] указано, что данное сопротивление является дополнительным трением между колесом-рельсом, из-за появления на рельсах тонкой пленки снега. В данном труде также указано: «В эксплуатационных условиях выпуска составов с горки, когда скатывание отцепов с горки происходит с интервалами всего в несколько секунд, плёнка снега на рельсах в подгорочной горловине не успевает образоваться, но на подгорных путях, куда отцепы часто попадают через довольно значительные интервалы, доходящие нередко до нескольких минут, дополнительное сопротивление вагонов движению даже при слабом снегопаде фактически имеет место».

Из этого следует вывод, что формулу для определения сопротивления от снега и инея для многовагонного отцепа можно представить в следующем виде:

$$w_{\text{си}}^{\text{отцеп}} = \frac{w_{\text{СИ}}^{\text{Iваг}}(t, m_{\text{Iваг}})m_{\text{Iваг}}}{m_{\text{отцеп}}}, \quad (2)$$

где  $w_{\text{СИ}}^{\text{Iваг}}$  и  $m_{\text{Iваг}}$  – сопротивление от снега и инея и масса первого вагона в отцепе, Н/кН, т;  $m_{\text{отцеп}}$  – масса отцепа, т.

На основании анализа распределения температуры наружного воздуха, можно сделать вывод о том, что влияние сопротивления от снега и инея при построении кривой распределения суммарного удельного сопротивления движению отцепа будет незначительным. Данное сопротивление учитывается только при температурах воздуха меньше 0 °С. В таблице 1 представлено распределение температуры наружного воздуха.

На основании формул (1) и (2) и [25] были построены кривые распределения сопротивления от снега и инея с учетом перерабатываемого вагонопотока и отцепопотока. Данные кривые представлены на рисунке 2. Кривая «Легкий» показывает распределение только для легкой весовой категории, «Одновагонные» – распределение с учетом вагонопотока, «Многовагонные» распределение с учетом отцепопотока и вагонопотока.

Таблица 1 – Распределение температуры наружного воздуха

Диапазон температур, °С	Больше 0	0...-15	-15...-25	Менее -25
Вероятность	0,6471	0,3517	0,0012	0

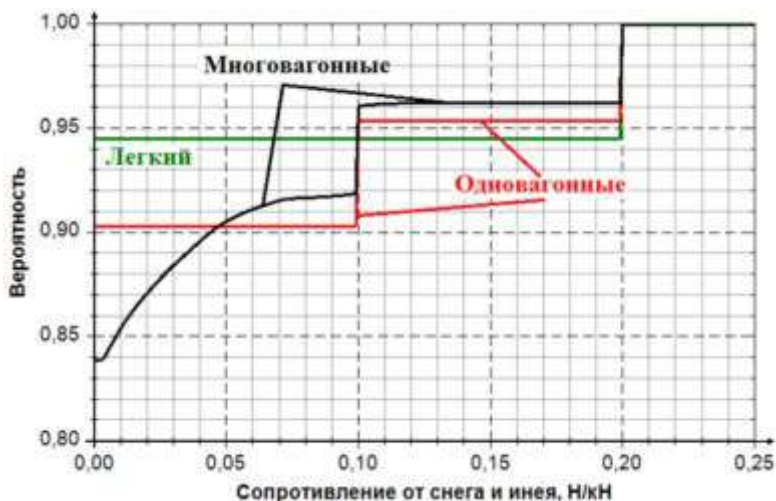


Рисунок 2 – Кривые распределения сопротивления от снега и инея с учетом многовагонных отцепов

Исходя из рисунка 2 можно сделать следующие выводы:

- на распределение сопротивления от снега и инея большое влияние будет оказывать распределение температуры наружного воздуха;
- при учете многовагонных отцепов кривая распределения сглаживается, так же вероятность появления значения более 0,1 Н/кН будет меньше, чем при учете только одновагонных или только легких отцепов.

**Сопротивление от среды и ветра.** Еще одним важным элементом в определении суммарного удельного сопротивления является сопротивление от среды и ветра. В статьях [20–21] уже поднимался вопрос о влиянии климатических условий на сопротивление движению отцепов. Но в данных статьях авторы делали акцент на определение расчетных месяцев, по которым необходимо рассчитывать благоприятные и неблагоприятные условия [22–23]. Данный подход также не лишен недостатка в плане того, что расчет ведется по сути для постоянных величин и с погрешностью. Для расчета сопротивления от среды и ветра необходимо задавать все значения распределениями, определяемыми для конкретного участка пути сортировочного парка.

Сопротивление от среды и ветра находится по известной формуле [24–25]:

$$w_{св} = cv^2_{отцеп} \quad (3)$$

где  $c$  – приведенный коэффициент воздушного сопротивления;  $v_{отцеп}$  – относительная результирующая скорость вагона (отцепа) с учетом направления ветра, м/с.

Приведенный коэффициент воздушного сопротивления в данной статье не приводится. Необходимо отметить, что данный коэффициент зависит от температуры окружающей среды, типа вагонов, количества вагонов в отцепе, угла между направлением ветра и осью участка пути, веса вагонов в отцепе. На данный коэффициент большое влияние будет оказывать отцепопоток и вагонопоток. Распределение температуры окружающего воздуха будет оказывать не значительное влияние.

Относительная скорость отцепа находится по следующей формуле [25]:

$$v^2_{отцеп} = v^2 + v^2_{ветра} \pm 2vv_{ветра}\cos\beta, \quad (4)$$

где  $v$  – скорость скатывания отцепа на участке пути, м/с.

По нормативу для расчета кривой распределения сопротивления от среды и ветра используется средняя скорость движения отцепа. Для сортировочного парка данная скорость равна 2 м/с. При этом, как показывают последние исследования, средняя скорость движения отцепа может отличаться для разных типов сортировочных путей из-за изменения профиля пути [27]. Плотность распределения скорости, полученная на основании эксперимента, представлена на рисунке 3.

По рисунку 3 можно сделать вывод, что средняя скорость движения отцепа в сортировочном парке для данного профиля будет отличаться от нормативной. Проведенные эксперименты на других профилях показывают, что разброс средней скорости может достигать до 1 м/с. Вторым важным выводом является то, что данное распределение имеет форму нормального распределения с асимметрией. Среднеквадратичное отклонение распределения равно 0,7 м/с.

Поэтому при расчете кривой распределения сопротивления от среды и ветра скорость движения отцепа необходимо задавать не постоянной величиной, заданной для всех сортировочных горок, а либо средней скоростью, вычисленной для этого участка пути, либо распределением. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что построение кривой распределения от среды и ветра с помощью аналитического выражения будет связано с большим количеством допущений, вследствие чего уменьшится точность полученных результатов. Для достижения требуемой точности расчетов необходимо использовать имитационное моделирование и проектировать горку с использованием имитационных моделей разной степени сложности. Подобные системы применялись при проектировании станции «Лужская» фирмой ОАО «Сименс» [28]. Кривые распределения сопротивления от среды и ветра, полученные с использованием имитационной модели, представлены на рисунках 4 и 5.

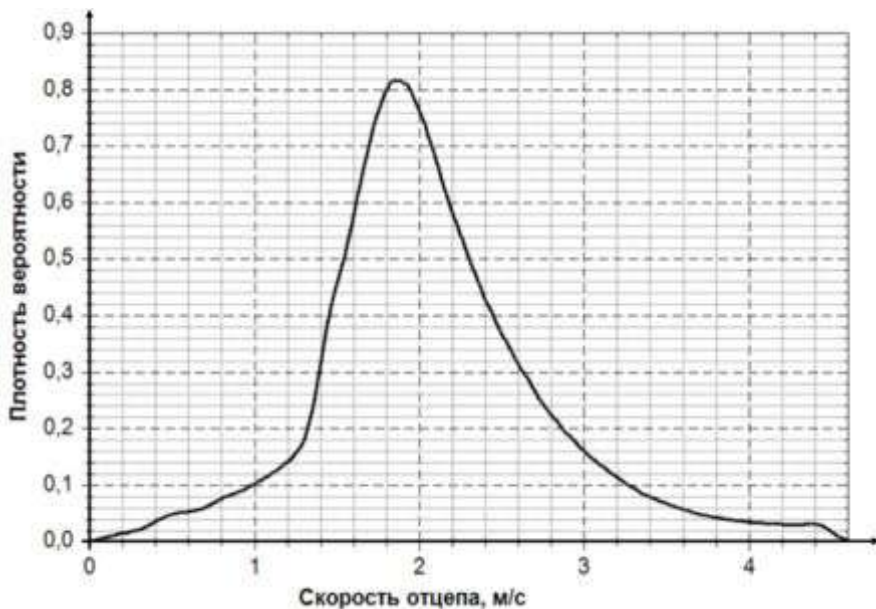


Рисунок 3 – Плотность распределения скорости движения отцепа в сортировочном парке

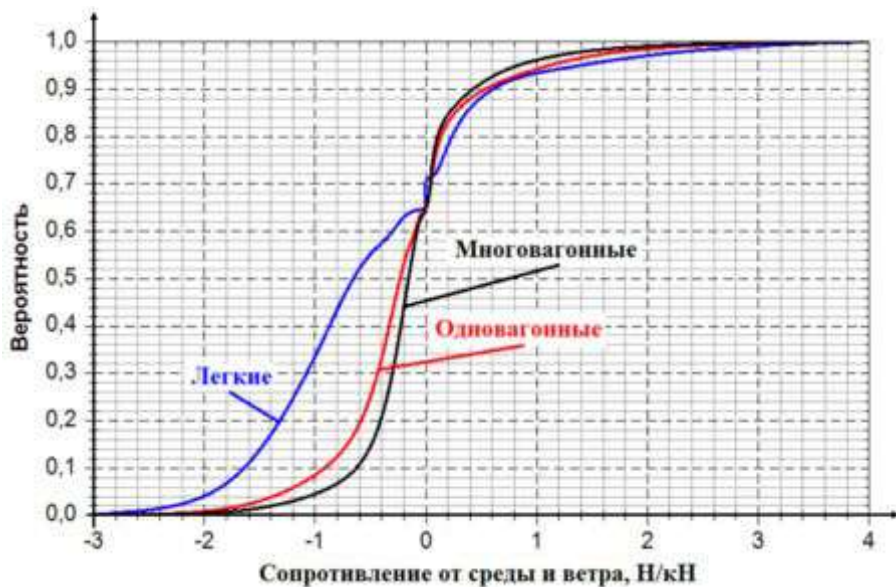


Рисунок 4 – Кривые распределения сопротивления от среды и ветра

Кривая «Экспериментальная» показывает распределение сопротивления от среды и ветра с учетом перерабатываемого отцепопотока и вагонопотока, «Постоянная скорость» – распределение сопротивления от среды и ветра для легких отцепов, рассчитанная для средней скорости 2 м/с.

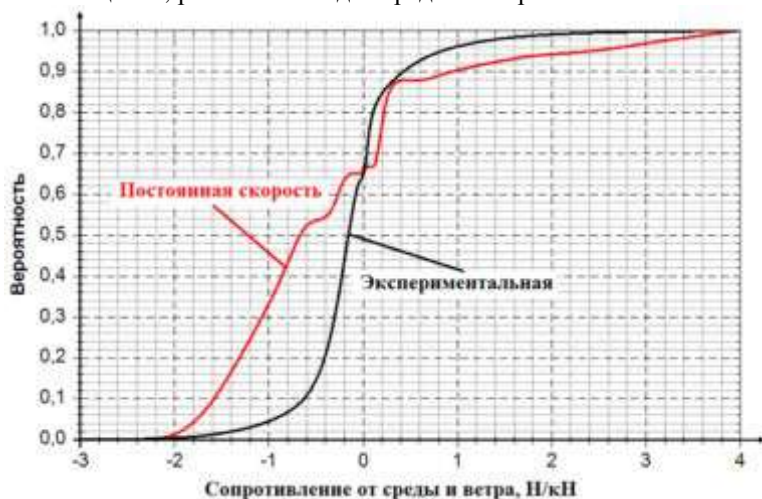


Рисунок 5 – Кривые распределения сопротивления от среды и ветра

По рисунку 4 и 5 можно сделать следующие выводы:

- распределение сопротивления от среды и ветра очень сильно зависит от перерабатываемого вагонопотока и отцепопотока;
- распределение сопротивления только для легких отцепов имеет очень сильный разброс и смещено ближе к отрицательным значениям сопротивления. Это объясняется тем, что на приведенный коэффициент воздушного сопротивления влияет масса отцепа. При прочих равных условиях разница в данном коэффициенте для вагонов легкой и тяжелой весовой категории будет отличаться в 3–4 раза в большую сторону. При увеличении массы коэффициент снижается и влияние ветра на отцеп также снижается;
- распределение от среды и ветра, полученное аналитическим путем, сильно отличается от экспериментального распределения. Это означает, что без учета факторов случайного характера параметров распределение будет построено недостаточно точно и проектирование сортировочной горки будет выполнено для более жестких условий.

**Суммарное удельное сопротивление** можно найти по формуле [25]:

$$W = w_0 + w_{св} + w_n + w_{ск}, \quad (5)$$

где  $w_0$  – основное удельное сопротивление движению вагонов, Н/кН;  $w_{ск}$  – сопротивление отцепа от стрелок и кривых, Н/кН.

В данном исследовании сопротивление отцепа от стрелок и кривых принято за нулевое значение.

Полученная на основе эксперимента кривая распределения представлена на рисунке 6.



Рисунок 6 – Кривые распределения суммарного удельного сопротивления

Согласно рисунку 6 можно сделать вывод о том, что учет вагонопотока и отцепопотока очень сильно влияет на кривую распределения суммарного удельного сопротивления. На рисунках 7 и 8 представлены кривые распределения и плотности распределения суммарного удельного сопротивления построенные на основе эксперимента и аналитическим путем.

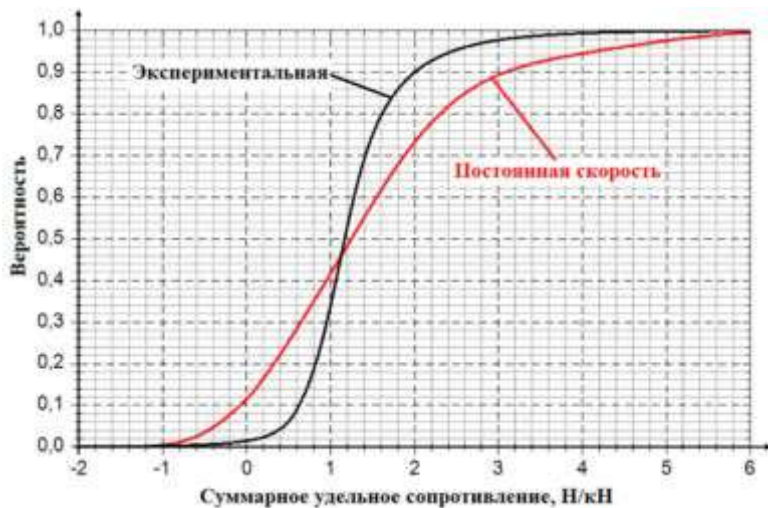


Рисунок 7 – Кривые распределения суммарного удельного сопротивления



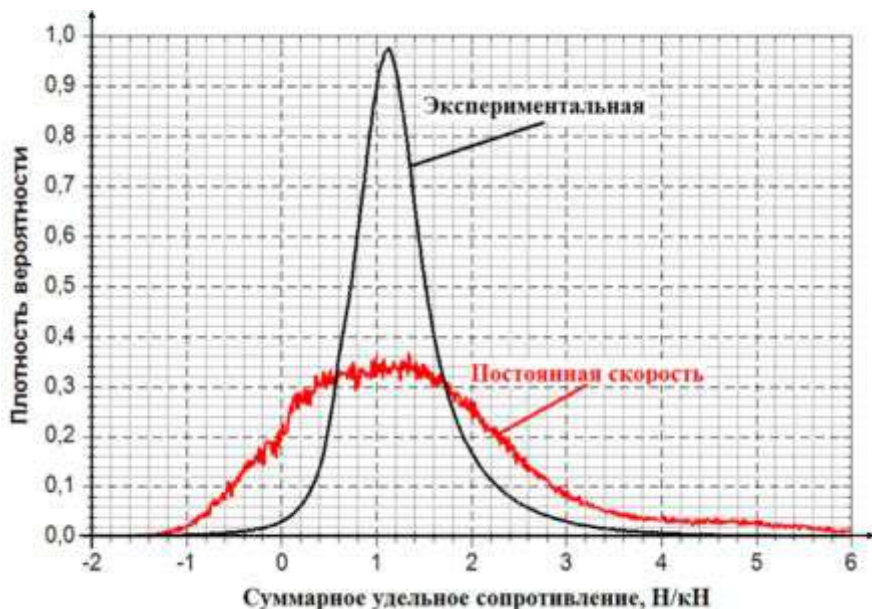


Рисунок 8 – Кривые плотности распределения суммарного удельного сопротивления

По рисункам 7 и 8 можно сделать вывод, что при проектировании сортировочных горок и выборе бегунов необходимо рассчитывать кривые распределения с учетом вагонопотока и отцепопотока и распределения скорости движения отцепов.

В таблице 2 представлены средние значения параметров сопротивлений от среды и ветра, суммарного удельного сопротивления, средняя скорость движения отцепа в сортировочном парке.

Таблица 2 – Средние значения параметров распределения сопротивлений

Параметр	Значение	Легкие	Одновагонные	Все
Средняя скорость движения отцепа, м/с	2	–	–	2,0804
Среднее сопротивление от среды и ветра, Н/кН	-0,3719	-0,4875	-0,1758	-0,1138
Среднее суммарное удельное сопротивление движению отцепов, Н/кН	1,4268	1,3113	1,2319	1,2627

### Выводы.

1 В данном исследовании было проанализировано влияние отцепопотока на удельные сопротивления движению отцепов. При повышении количества вагонов в отцепе дисперсия и асимметрия почти всех распределений уменьшается. В результате чего вероятность появления бегунов с повышен-

ным или пониженным суммарным удельным сопротивлением очень сильно уменьшается от вероятностей только для легкой или тяжелой весовой категории.

2 При учете отцепопотока и вагонопотока при построении распределения основного удельного сопротивления было выявлено, что вероятность появления очень плохого бегуна в 10 раз меньше, чем только для легких отцепов и в 2 раза меньше, чем при учете только одновагонных отцепов.

3 Еще одним важным выводом является то, что в статье была представлена невозможность построения кривых распределения сопротивления от среды и ветра и, следовательно, кривой распределения суммарного удельного сопротивления с помощью аналитических и других методов, кроме непосредственно имитационного моделирования. Это следует из того, что сопротивление от среды и ветра зависит от скорости движения отцепа и скорости движения ветра. При этом на разных участках сортировочного комплекса будет разная скорость движения отцепа, которая обуславливается изменением профиля пути или тормозных воздействий шин замедлителя. Следовательно, скорость движения необходимо представлять, как распределение скорости на данном участке. И даже полученная по данному распределению средняя скорость может сильно отличаться от нормативной.

4 Полученные выводы свидетельствуют о невозможности расчета сортировочного комплекса только с помощью математических формул. Для проектирования сортировочных комплексов необходимо применять методику имитационного моделирования, которая будет учитывать большое количество переменных факторов и будет обладать более высокой точностью по сравнению с математическим расчетом. Кроме этого на подобных моделях можно ставить эксперименты, что является несомненным плюсом при расчете экономического эффекта от планируемой модернизации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 *Корниенко, К. И.* Построение кривой распределения основного удельного сопротивления движению вагонов в сортировочном парке с учетом перерабатываемого вагонопотока и отцепопотока / К. И. Корниенко // Вестник СГУПС. 2019. № 1 (48). – С. 20–28.

2 *Корниенко, К. И.* Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 23610. Программа для имитационного моделирования заполнения пути сортировочного парка «СортПарк 2» / К. И. Корниенко. Дата регистрации 15.05.2018.

3 *Корниенко, К. И.* Совершенствование методики имитационного моделирования заполнения пути сортировочного парка / К. И. Корниенко // Транспорт Урала. – 2018. – № 2 (57). – С. 35–42.

4 *Kornienko, K.* Effect of the sorting track profile change on the it's occupancy quality at train humping: / K. Kornienko, S. Bessonenko // MATEC Web of Conferences 216, 02012. – 2018. – Mode of access: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201821602012>. – Date of access: 17.10.2020.

5 Bessonenko, S. Influence of opposite elevation on the occupancy level of the tracks of sorting park / S. Bessonenko, K. Kornienko, I. Tanaino // MATEC Web of Conferences 239, 03002. – 2018. Mode of access <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823903002>. Date of access: 17.10.2020.

6 Kornienko K., Tanaino I., Bessonenko S. Using the Coefficient of Concavity in the Analysis of the Quality of Filling the Tracks of the Hump Yard / K. Kornienko, I. Tanaino, S. Bessonenko // Advances in Intelligent Systems and Computing 1115, 655–662, 2020. Mode of access: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_63). Date of access: 17.10.202.

7 Соппротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / под ред. Е. А. Сотникова. – М. : Транспорт, 1975. – 104 с.

8 Бессоненко, С. А. Принципы оптимизации параметров сортировочных горок / С. А. Бессоненко // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 5. – С. 17–20.

9 Правдин, Н. В. Определение уклонов скоростных участков и тормозных позиций на спускной части сортировочной горки / Н. В. Правдин, С.А. Бессоненко // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 9. – С. 6–10.

10 Бессоненко, С. А. Вероятностный подход к расчету сортировочных горок / С. А. Бессоненко // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 3. – С. 23–25.

11 Правдин, Н. В. Анализ существующих методов расчёта сортировочных горок / Н. В. Правдин, С. А. Бессоненко // Транспорт: наука, техника, управление. – 2004. – № 5. – С. 22–27.

12 Бессоненко, С. А. Математическая модель расчета параметров интервального торможения отцепов и переменных скоростей роспуска составов / С. А. Бессоненко, В. Н. Иванченко, А. М. Лященко // Вестник РГУПС. – 2013. – № 1. – С. 55–65.

13 Правдин, Н. В., Бессоненко, С. А. Расчет закона распределения вероятностей удельного сопротивления движению отцепов на сортировочной горке / Н. В. Правдин, С. А. Бессоненко // Транспорт: наука, техника, управление. – 2006. – № 3. – С. 3–10.

14 Справочник по климату СССР. Вып. 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области и Алтайский край. Ч. 2. Температура воздуха и почвы / отв. ред. С. Я. Пахневич. – Л. : Гидрометеиздат, 1965. – 396 с.

15 Pokrovskaya, O. Evolutionary-functional approach to transport hubs classification / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // 2020 Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – P. 356–365. – DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8\_33.

16 Pokrovskaya, O. Terminalistics as the methodology of integrated assessment of transportation and warehousing systems / O. Pokrovskaya // Web of Conferences 10. Ser. "10th International Scientific and Technical Conference "Polytransport Systems", PTS 2018". – 2018. P. 02-14. – DOI: 10.1051/mateconf/201821602014.

17 Pokrovskaya, O., Fedorenko, R. Assessment of Transport and Storage Systems / O. Pokrovskaya, R. Fedorenko // Advances in Intelligent Systems and Computing: 8th International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2019; Novosibirsk; Russian Federation; 22 May 2019. 1115 AISC. 2020. – P. 570-577. – DOI: 10.1007/978-3-030-37916-2\_55.

18 Осипов, Д. В. Влияние метеорологических условий на отрыв отцепов от состава на перевальной части сортировочной горки / Д. В. Осипов // Модернизация процессов перевозок, систем автоматизации и телекоммуникаций на транспорте : материалы Межрегиональной науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2010. – Том 1. – С. 93–98.

19 *Осипов, Д. В.* Совершенствование методов расчета параметров перевальной части сортировочных горок: дис. канд. техн. наук: 05.22.08 / Д. В. Осипов. – Новосибирск, 2017. – 191 с.

20 *Ситников, С. А.* Влияние климатических условий на сопротивление движению вагона при скатывании с сортировочной горки / С. А. Ситников, Л. А. Рыкова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2011. – № 11. – С. 22–24.

21 *Ситников С. А., Рыкова, Л. А., Конев, А. Ф.* Проблемы определения расчётных метеорологических условий при проектировании новых и реконструкции существующих сортировочных горок / С. А. Ситников, Л. А. Рыкова, А. Ф. Конев // Транспорт: Наука, техника и управление. – 2011. – № 5. – С. 19–22.

22 Железнодорожные станции и узлы / В. Г. Шубко [и др.]; под ред. В. Г. Шубко и Н. В. Правдина. – М. : УМК, МПС России, 2002. – 368 с.

23 Железнодорожные станции и узлы (задачи, примеры, расчёты) : учеб. пособие для вузов ж. д. транспорта / Н. В. Правдин [и др.]; под ред. Н. В. Правдина и В. Г. Шубко. – М. : Маршрут, 2005. – 502 с.

24 Пособие по применению правил и норм проектирования сортировочных устройств / Ю. А. Муха [и др.]. М. : Транспорт, 1994. – 220 с.

25 Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах колеи 1520 мм. – М. : Техинформ, 2003. – 168 с.

26 *Страковский, И. И.* Сопротивление вагонов при скатывании с горки в зимнее время / И. И. Страковский // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 63. – М. : 1952. – 122 с.

27 Исследование влияния профиля горки на скорость движения отцепов в сортировочном парке при попутном ветре / Е. А. Ахмаев [и др.] // Вестник СГУПС. – 2017. – № 1 (40). – С. 13–18.

28 *Смагин, Ю. С.* Система MSR32 на станции Лужская-Сортировочная / Ю. С. Смагин, О. В. Подсосонная // Железные дороги мира. – 2017. – № 8. – С. 63–71.

*K. KORNIENKO*

## **PLOTTING OF THE PROBABILITY CURVE OF THE SPECIFIC MOTION RESISTANCE IN THE CLASSIFICATION TRACKS TAKING INTO ACCOUNT THE CAR AND CUT TRAFFIC VOLUME**

To date, the design of gravity hump is carried out in accordance with the “Rules and regulations for design of sorting devices on 1520 mm railways tracks”. Runners with specified characteristics by mass and specific motion resistance are used for calculation. When the car moves in gravity hump, it is affected by other types of specific motion resistance, which are also specified by the normative values. It can distinguish such as the temperature distribution of the outside air, the distribution of direction and force of the wind, the turbulence of the wind, the processed car and traffic volume, the speed of the car at various sections of the gravity hump. All these parameters are taken into account with a low accuracy, because of which there is an overestimation of the specifications of the gravity hump. In this article, the influence of these factors on the distribution of the specific motion resistance in the classification track is considered. For the study, it used the developed simulation model for filling the classification track. As a result of the research, a distribution curve of the total resistivity was constructed.

Получено 17.10.2020