

УДК 656.212.5.08

Е. А. ФИЛАТОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Транспортные узлы», Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Республика Беларусь, тел. (0232) 95-39-48, эл. почта filatoff.ea@yandex.ru, ORCID 0000-0001-7710-3110

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПУТЕВЫХ СТРУКТУР ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ ПО КРИТЕРИЮ БЕЗОПАСНОСТИ

**Цель.** Целью исследования является поиск и разработка универсального метода, позволяющего рассчитывать параметры путевых структур железнодорожных станций по критерию безопасности. **Методика.** Установлено, что при выполнении маневров на станциях существует запрет на выполнение автоматического сцепления подвижного состава при остановке в криволинейных участках пути. Это объясняется сложившейся неопределенностью в точном установлении безопасных условий взаимодействия подвижного состава. На практике это вызывает потребность контроля сцепления вагонов причастными работниками. Существующие методы расчета позволяют определять условия эффективного взаимодействия только в круговых и *s*-образных кривых без прямой вставки и имеют ряд ограничений на применение. Однако, проведенный анализ схем путевого развития существующих станций позволил выделить почти два десятка достаточно распространенных расчетных условий взаимодействия. Наиболее доступным и универсальным способом, обеспечивающим близкий к эксперименту результат, является имитационное моделирование процесса сцепления подвижного состава на участках путей различной конфигурации. Для создания модели необходимо реализовать алгоритм, включающий решение ряда задач: 1) создание математической модели исследуемого участка пути; 2) моделирование положения взаимодействующих вагонов и их консолей в любой точке исследуемого участка пути; 3) определение траекторий движения осей сцепления автосцепок вагонов и линий, характеризующих расстояние между осями сцепления вагонов (суммарный вынос консолей), а также величины эффективной ширины захвата автосцепок в зависимости от геометрии пути; 4) моделирование условий взаимодействия двух вагонов и определение эффективности автоматического сцепления. **Результаты.** Применение компьютерного имитационного моделирования позволяет значительно расширить возможности исследования условий взаимодействия вагонов на участках с различными геометрическими параметрами. Так, определены условия и характер процессов взаимодействия автосцепных приборов вагонов (на примере длиннобазной платформы длиной 26,22 м) на участках сопряжения круговой кривой с прямой и *s*-образной кривой без прямой вставки, когда вагон не размещается на них целиком ( $l_{кр} < 2l + n$ ). Метод позволяет определять ограничения на применение *s*-образных кривых с прямой вставкой. В результате моделирования получены длины и величины радиусов кривых, обеспечивающих эффективность выполнения операций автоматического сцепления с длиннобазными вагонами. Установлено, что конструкция и размеры некоторых длиннобазных вагонов не обеспечивают условий сцепления на стрелочных переводах марок 1/6 и 1/9. Такие вагоны целесообразно выделять в отдельную категорию сверхдлиннобазных, для применения в маневровой работе с ними соответствующих мер безопасности. Кроме того, определены размеры зоны, в пределах которой не обеспечиваются условия взаимодействия вагонов, что важно для размещения грузовых фронтов и других сооружений в привязке к плану путевого развития. **Научная новизна.** Разработана имитационная модель процесса взаимодействия вагонов на участках путей различной конструкции. При этом учет дополнительного поперечного смещения выполняется при определении координат каждой тележки по отдельности. Её компьютерная реализация позволяет исследовать параметры путевых структур железнодорожных станций и устанавливать требования к конструкции и геометрическим параметрам пути, обеспечивающие эффективность сцепления вагонов. Установлены некоторые типы вагонов, выполнение маневров с которыми может создавать критические условия взаимодействия. **Практическая значимость.** Формализация условий, создающих ограничения на выполнение маневровых операций позволяет идентифицировать вагоны, создающие неблагоприятные условия взаимодействия, локализовать наиболее опасные участки путей на станциях и выделить безопасные технологические маршруты пропуска длиннобазных вагонов. Использование результатов моделирования при проектировании и реконструкции железнодорожных станций позволит минимизировать участие человека в процессе сцепления вагонов, повысить эффективность и безопасность выполнения маневровой работы, расширить возможности применения систем автоматизации в перспективе. Разработанная имитационная модель позволяет также выполнять оценку условий обеспечения габаритов приближения на железнодорожном транспорте.

**Ключевые слова:** длиннобазные вагоны, геометрические параметры элементов путевого развития, имитационное моделирование, безопасность взаимодействия вагонов.

## Вступление

На сегодняшний день при выполнении маневровой работы на станции существует запрет на выполнение автоматического сцепления вагонов при их остановке на криволинейных участках пути. Такой запрет возник как следствие существующей неопределенности условий взаимодействия, когда создается ненормативный вынос консольных частей вагонов в зонах криволинейных участков путей. Как показывают выполненные исследования [1], автоматическое сцепление может не обеспечиваться с различными вагонами, в том числе массовых типов. На практике это и привело к введению технологических ограничений на выполнение операций сцепления с вагонами большинства типов.

Формализация условий, создающих ограничения на выполнение маневровых операций является важным шагом для локализации неблагоприятных участков путей на станции и идентификации вагонов, имеющих несовершенную конструкцию. Это позволит снять некоторые технологические ограничения при выполнении маневров, а в перспективе возможно и полностью отказаться от применения ручного труда при сцеплении подвижного состава.

Существующие методы [1, 2] позволяют установить допустимые величины радиусов круговых и *s*-образных кривых для случаев, когда: длины расчетных кривых (в том числе составляющих *s*-образную) превышают длину базы и консольной части вагонов; сцепление выполняется в одной наиболее неблагоприятной точке двух одинаковых вагонов. Однако, анализ схем путевого развития существующих станций и параметров перерабатываемых вагонопотоков позволил значительно расширить перечень наиболее встречающихся расчетных условий взаимодействия (табл. 1).

Как видно из данных таблицы 1, существующие ограничения [2, 3], а также графические и аналитические методы [1] определения допустимых величин радиусов криволинейных участков путей (случаи 1.2.1 и 2.1.1) не позволяют учесть всего многообразия ситуаций, встречающихся на практике.

**Цель.** Целью исследования является поиск и разработка универсального метода, позволяющего рассчитывать параметры путевых структур железнодорожных станций по критерию безопасности. Это позволит существенно расширить и уточнить имеющиеся ограничения на параметры криволинейных участков путей [1-3] и разработать специальные требования к про-

ектированию путевого развития железнодорожных станций.

Таблица 1

**Наиболее распространенные сочетания условий взаимодействия подвижного состава**

№ п/п	Конструкция участка пути		Примечание
1	<i>Сочетания круговых кривых</i>		
1.1	Одиночная (переводная) кривая		$l_{кр} \geq 2(2l+n)$
1.2	1.2.1	Сопряжение кривой (переводной) и прямой	$l_{кр} \geq 2l+n$
	1.2.2		$l_{кр} < 2l+n$
1.3	1.3.1	Сопряжение двух однонаправленных кривых (переводных)	$d_0 = 0$ $l_{кр} \geq 2l+n$
	1.3.2		$l_{кр} < 2l+n$
1.4	1.4.1		$d_0 > 0$ $l_{кр} \geq 2l+n$
	1.4.2		$l_{кр} < 2l+n$
2	<i>Сочетания s-образных кривых</i>		
2.1	2.1.1	Образованные кривыми (переводными) без прямой вставки ( $d_0 = 0$ )	$l_{кр1,2} \geq 2l+n$
	2.1.2		$l_{кр1,2} < 2l+n$
	2.1.3		$l_{кр1,2} \geq 2l+n > l_{кр2,1}$
2.2	2.2.1	Образованные кривыми (переводными) с прямой вставкой ( $d_0 > 0$ )	$l_{кр1, кр2} \geq 2l+n$
	2.2.2		$l_{кр1, кр2} < 2l+n$
	2.2.3		$l_{кр1,2} \geq 2l+n > l_{кр2,1}$
2.3	2.3.1	Образованные составными кривыми без прямой вставки ( $d_0 = 0$ )	$l_{кр1, кр2} \geq 2l+n$
	2.3.2		$l_{кр1, кр2} < 2l+n$
	2.3.3		$l_{кр1,2} \geq 2l+n > l_{кр2,1}$
2.4	2.4.1	Образованные составными кривыми с прямой вставкой ( $d_0 > 0$ )	$l_{кр1, 2} \geq 2l+n$
	2.4.2		$l_{кр1, 2} < 2l+n$
	2.4.3		$l_{кр1,2} \geq 2l+n > l_{кр2,1}$

Примечание:  $l_{кр}$  – длина кривой,  
 $2l$  – длина базы вагона,  
 $n$  – длина консоли вагона,  
 $d_0$  – длина прямой вставки

## Методика

Наиболее простым способом достижения указанной цели является экспериментальная проверка различных элементов путевого развития на обеспечение эффективного сцепления подвижного состава. Однако, для определения всего комплекса требований к проектированию, необходимо иметь испытательный полигон со значительным количеством расчетных конструкций путевого развития (таблица 1), что является весьма затруднительным. Более доступным способом, обеспечивающим близкий к эксперименту результат, является имитационное моделирование процесса сцепления подвижного состава на участках путей различной конфигурации. Для создания такой модели необходимо решить ряд задач [4]:

1) создание математической модели исследуемого участка пути;

2) моделирование положения взаимодействующих вагонов и их консолей в любой части исследуемого участка пути;

3) определение траекторий движения осей сцепления автосцепок вагонов и линий, характеризующих изменение суммарного выноса консольных частей и изменение величины эффективной ширины захвата автосцепок в зависимости от геометрии пути;

4) графоаналитическое представление процесса взаимодействия двух вагонов и определение эффективности автоматического сцепления.

1. Геометрически путь представляет собой комбинацию прямолинейных и криволинейных участков пути и в общем виде может быть описан функцией

$$F(x) = \begin{cases} f_1(x) x \in [x_1; x_2], \\ f_2(x) x \in [x_2; x_3], \\ \dots \\ f_n(x) x \in [x_{n-1}; x_n], \end{cases}$$

где  $f_i(x)$  – функция, описывающая  $i$ -й элемент пути: окружность  $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$ , прямая  $(y - y_1)/(y_2 - y_1) = (x - x_1)/(x_2 - x_1)$  и др.

2. Далее необходимо определить положение вагона на исследуемом участке пути. Для этого рассчитываются координаты оси первой по ходу движения тележки. Задаваясь координатой  $x_{1T}$  первой тележки на оси пути, исходя из математической модели пути определяется вторая координата  $y_{1T}$ . При этом учитывается, что при нахождении тележки на прямом участке пути траектория ее движения будет совпадать с координатами участка пути. Координата  $y_{1T}$  оси первой тележки в прямой

$$y_{1T} = ((x_{1T} - x_{np})(y_{kp} - y_{np})) / (x_{kp} - x_{np}) + y_{np},$$

где  $x_{np}$ ,  $y_{np}$ ,  $x_{kp}$ ,  $y_{kp}$  – координаты начала и конца прямого участка соответственно.

Если тележка движется по кривой радиуса  $R$  (линия 1, рис. 1) и центром в точке  $(x_0; y_0)$ , то ее положение смещается относительно оси пути на высоту сегмента  $h_t$ , очерченного базой тележки  $2l_t$  (линия 2, рис. 1), [2, 5]. Кроме того, согласно норм для расчета и проектирования вагонов [2] при определении положения вагонов в кривой необходимо учитывать дополнительное поперечное смещение  $\lambda$  наружу кривой, обусловленное особенностями конструкции и размещения тележки в колее (линия 3, рис. 1).

Таким образом, координата  $y_{1T}$  оси первой тележки в кривой с учетом её возможного смещения

$$y_{1T} = y_0 \pm \sqrt{(R - h_t + \lambda)^2 - (x_{1T} - x_0)^2},$$

знак  $\pm$  определяет направление кривой (лево «-», право «+»).

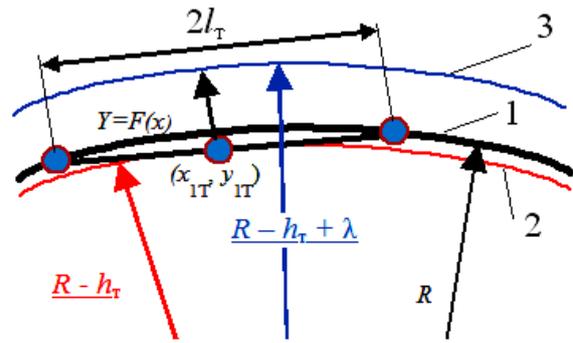


Рис. 1. Расчетная схема положения оси тележки

Величину  $h_t$  при этом можно определять приближенным способом [2], либо точно [5]:

$$h_t = R - \sqrt{R^2 - l_t^2}.$$

Положение второй тележки ( $x_{2T}; y_{2T}$ ) определяется на пересечении окружности, с радиусом равным базе вагона  $2l$  и центром в точке размещения первой тележки  $(x_{1T}, y_{1T})$ , и траекторией движения второй тележки, которая устанавливается аналогично, как и для первой тележки.

Для расчета положения второй тележки при её расположении в прямой решается система уравнений

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + A_k x + B_k y + C_k = 0, \\ A_p x + B_p y + C_p = 0, \end{cases}$$

где  $A_k = -2x_{1T}$ ;  $B_k = -2y_{1T}$ ;  $C_k = x_{1T}^2 + y_{1T}^2 - 2l^2$ ;  $A_p = y_2 - y_1$ ,  $B_p = x_2 - x_1$ ,  $C_p = x_2 \cdot y_1 - x_1 \cdot y_2$ .

Система приводится к уравнению

$$Ax^2 + Bx + C = y,$$

где  $A = 1 + k^2$ ;  $B = 2k \cdot b + A_k + B_k \cdot k$ ;  $C = b^2 + B_k \cdot b + C_k$ ,  $k = -A_p/B_p$ ;  $b = -C_p/B_p$ .

Решая уравнение при помощи дискриминанта  $D = B^2 - 4AC$ , получаем абсциссу положения второй тележки

$$x_{2T} = (-B - \sqrt{D}) / (2A).$$

Зная уравнение прямого участка пути, находится ордината оси второй тележки,

$$y_{2T} = k \cdot x_{2T} + b.$$

При расположении второй тележки в кривой система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + A_b x + B_b y + C_b = 0, \\ x^2 + y^2 + A_p x + B_p y + C_p = 0, \end{cases}$$

где первое уравнение описывает окружность радиуса  $2l$ , а второе – криволинейную траекторию движения второй тележки (линия 3, рис. 1).

Расстояние между центрами этих окружностей

$$d = \sqrt{(x_{1T} - x_0)^2 + (y_{1T} - y_0)^2}.$$

Части этого отрезка, образованные пересечением с хордой, образованной точками пересечения окружностей, равны

$$a = ((R - h_T + \lambda)^2 - (2l)^2 + d^2)/(2d) \text{ и } b = d - a.$$

Высота треугольника, образованного радиусами окружностей и отрезком  $d$

$$h = \sqrt{(R - h_T + \lambda)^2 - a^2}.$$

Координаты основания этой высоты

$$x_2 = x_0 + a(x_{1T} - x_0)/d; y_2 = y_0 + a(y_{1T} - y_0)/d.$$

Координаты второй тележки, таким образом

$$x_{2T} = x_2 \pm h(y_{1T} - y_0)/d; y_{2T} = y_2 \pm h(x_0 - x_{1T})/d.$$

Полученные координаты осей двух тележек вагона, определяют положение любого элемента его конструкции (груза) относительно пути. Это позволяет применять описанный подход для решения таких важных задач, как: определение: координат крайних точек кузова вагона для обеспечения габарита приближения строений или подвижного состава, установление координат груза для обеспечения габарита погрузки и других.

3. Зная координаты тележек вагона можно определить положение оси сцепления автосцепок вагона. Для этого рассчитываются величины приращения координат консолей вагона

$$dx = n(x_{1T} - x_{2T})/2l; dy = n(y_{1T} - y_{2T})/2l.$$

Координаты автосцепок, таким образом

$$x_n = x_{1T, 2T} \pm dx; y_n = y_{1T, 2T} \pm dy,$$

где знак « $\pm$ » определяет положение взаимодействующей автосцепки (задняя автосцепка первого вагона «-», передняя автосцепка второго вагона «+»).

Для определения величины выноса консольной части вагона относительно оси пути, необходимо найти координаты проекции оси сцепления на путь  $(x_p, y_p)$ .

В случае размещения консоли над прямым участком эта точка является основанием перпендикуляра к оси пути, проходящего через ось сцепления автосцепки. Ее координаты равны

$$x_p = [(x_{kp} - x_{np})(y_{kp} - y_{np})(y_n - y_{np}) + x_{np}(y_{kp} - y_{np})^2 + x_n(x_{kp} - x_{np})^2] / [(y_{kp} - y_{np})^2 + (x_{kp} - x_{np})^2];$$

$$y_p = (y_{kp} - y_{np})(x_0 - x_{np}) / (x_{kp} - x_{np}) + y_{np}.$$

При размещении консоли в зоне криволинейного участка пути, точка  $(x_p, y_p)$  расположена на пересечении двух линий: 1) прямой, проходящей через центр окружности, описывающей криволинейный участок пути  $(x_0; y_0)$  и ось сцепления автосцепки  $(x_n; y_n)$ ; 2) кривой, характеризующей ось пути. Расстояние между точками  $(x_n; y_n)$  и  $(x_0; y_0)$

$$L = \sqrt{((x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2)}.$$

Приращение координаты  $x_p$  относительно  $x_0$

$$dx = (R_0(x_n - x_0)) / L.$$

Координаты проекции оси сцепления взаимодействующей автосцепки на путь

$$x_p = x_0 + dx; y_p = y_0 \pm \sqrt{(R_0^2 - dx^2)},$$

где знак « $\pm$ » определяется направлением кривой.

Определение координат консольной части второго вагона относительно пути  $(x_{p2}; y_{p2})$  выполняется аналогичным образом при условии  $(x_{p1}; y_{p1}) = (x_{p2}; y_{p2})$ .

Расстояние между осями сцепления автосцепок  $(x_{n1}; y_{n1})$  и  $(x_{n2}; y_{n2})$ , взаимодействующих вагонов соответствует суммарному выносу консолей вагонов  $b$  [2].

На основании рассчитанных ранее координат тележек  $(x_{1T}, y_{1T})$  и  $(x_{2T}, y_{2T})$  определяется разность углов наклона продольных осей вагонов, характеризующая угол пересечения продольных осей автосцепок  $\beta_0$ . Величина этого угла и определяет эффективную ширину захвата автосцепки  $B$  [2].

Сравнение величин  $b$  и  $B$  позволяет сделать вывод о безопасности автоматического сцепления при заданном положении вагона.

Повторяя расчет с последовательным приращением координаты  $x_{1T}$  первой тележки первого вагона  $\Delta x_{1T}$ , рассчитываются величины  $b_i$  и  $B_i$ .

4. Учитывая, что линейные размеры вагонов значительно больше смещения автосцепок вагонов, то целесообразно представить полученные результаты в виде специального графика. Для этого необходимо задаться осями: ось абсцисс характеризует развернутую длину пути в метрах (откладываются координаты проекции оси сцепления  $x_{pi}$ ); ось ординат определяет положение автосцепки, относительно точки на оси пути  $x_{pi}$  в миллиметрах (откладываются величины  $b_i$  и  $B_i$ ). Соединяя соответствующим

образом полученные точки между собой получаем линии, характеризующие изменение предельного положения автосцепок вагонов и эффективной ширины захвата на изучаемом участке пути [4]. Компьютерная реализация рассмотренного алгоритма значительно упрощает вычисления и позволяет моделировать условия взаимодействия двух вагонов на участках путей различной конфигурации. На рис. 2 показан пример графического изображения результатов моделирования положения автосцепок вагонов при движении по *s*-образной кривой, образованной двумя круговыми радиуса 200 м. Линия 1 и 2 описывает траекторию движения задней автосцепки первого вагона и передней автосцепки второго вагона соответственно. Изменение суммарного выноса консольных частей вагонов *b* с учетом дополнительного поперечного смещения  $\lambda$  наружу кривой описывается линией 3, а без него – линией 4. Линия 5 показывает изменение эффективной ширины захвата автосцепки. Так как положение линий 3 и 4 выше линии 5, то это однозначно указывает на несоблюдение условия эффективного сцепления восьмиосных полувагонов на рассматриваемом участке пути.

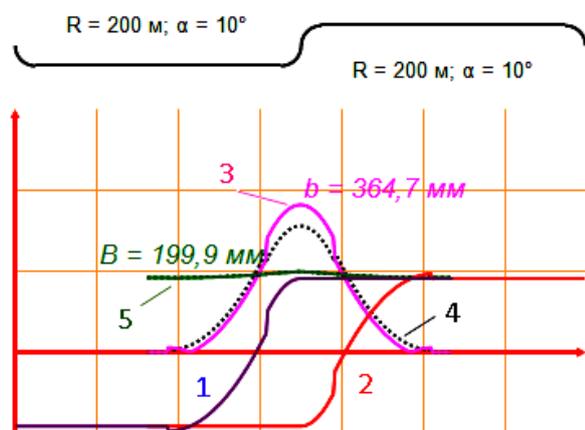


Рис. 2. Моделирование процесса взаимодействия двух восьмиосных полувагонов в *s*-образной кривой

Результаты, полученные при помощи имитационного моделирования для частных случаев: круговых (вариант 1.2.1, табл. 1) и *s*-образных кривых без прямой вставки (вариант 2.1.1, табл. 1), – полностью соответствуют результатам расчетов графическим и аналитическим способами [1] и подтверждают корректность предложенного метода.

Представленный способ является универсальным решением для определения параметров путевых структур по критерию безопасности. Он позволяет исследовать изменение траекторий

движения консольных частей не только однотипных, но и различных вагонов в случаях, когда невозможно применение графического и аналитического методов [1, 4, 5], (табл. 1). Рассмотренная модель позволяет определять ограничения на параметры круговых и *s*-образных кривых без прямых вставок при их длинах менее длин вагонов (случаи 1.2.2 и 2.1.2, табл. 1), а также минимальные длины прямых вставок в *s*-образных кривых (случай 2.2.1, табл. 1). Так, например, эффективность взаимодействия двух четырехосных платформ длиной 26,22 м в кривых с широко применяемыми величинами радиусов не обеспечивается [1]. Однако, эффективность сцепления таких вагонов при малых радиусах можно достичь за счет уменьшения длин круговых (верхняя линия, рис. 3) и *s*-образных кривых без прямых вставок (нижняя линия, рис. 3).

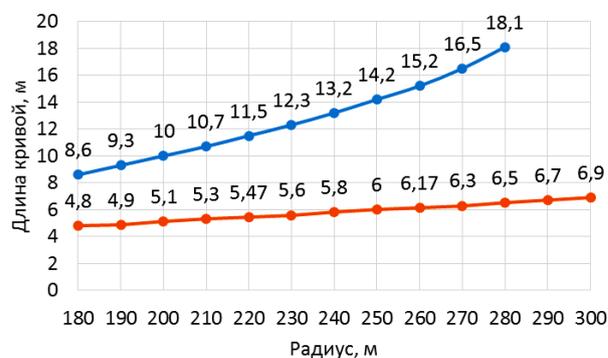


Рис. 3. Параметры круговых и *s*-образных кривых, обеспечивающие эффективность взаимодействия двух четырехосных платформ (длина по осям автосцепки – 26,22 м, СА-3)

Как показано в табл. 1, на практике часто встречаются комбинированные элементы путевого развития. Так, достаточно частым сочетанием в зоне вероятного сцепления горловин станций является взаимное расположение стрелочного перевода и круговой кривой в двух сочетаниях: когда переводная и круговая кривые направлены в одну сторону, или в разных направлениях (табл. 1). Наихудшие условия взаимодействия создаются во втором случае (рис. 4).

На рис. 4 показана зависимость радиусов закрестовинных кривых, расположенных за стрелочным переводом марки 1/6 и длины вставки между ними (с учетом стрелочного перевода), обеспечивающих эффективность сцепления некоторых длиннобазных вагонов (1 – платформ с базой 16,5 м и консолью 2,58 м; 2 – восьмиосных цистерн с базой 13,92 м и консолью

лью 3,665 м; 3 – восьмиосных полувагонов с базой 12,07 м и консолью 4,085 м). Как видно из рисунка характер изменения безопасных параметров *s*-образных кривых зависит от размещения консольных частей вагонов в прямом участке пути.

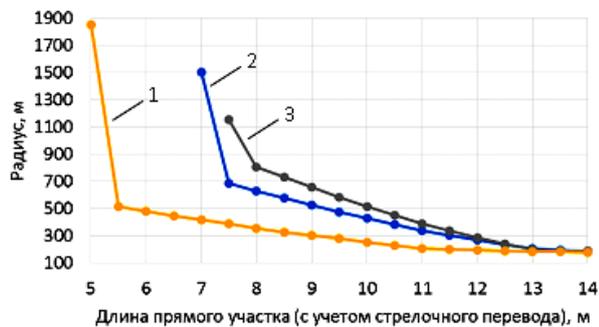


Рис. 4. Параметры *s*-образных кривых, образованных стрелочным переводом марки 1/6, прямым участком и закрестовинной кривой, обеспечивающие эффективность сцепления длиннобазных вагонов

Наиболее жесткие требования к путевому развитию создаются при выполнении маневровой работы с четырехосными платформами (база 19 м, консоль 3,61 м, СА-3) и аналогичных размеров, безопасность взаимодействия с ними обеспечивается при сопряжении кривого и прямого участка путей при радиусе не менее 290 м [1, 4, 5], а при радиусе 200 м длина кривой должна быть ограничена и составлять не более 10 м (рис. 3). Этим условиям не соответствуют переводные кривые широко применяемых стрелочных переводов марок 1/6 и 1/9 (даже при применении автосцепки СА-3М). Поэтому целесообразно типы вагонов, обладающие такими линейными размерами и не обеспечивающие эффективность сцепления в зонах размещения стрелочных переводов, дополнительно выделять в отдельную категорию – сверхдлиннобазных вагонов.

Как видно из представленных примеров, метод раскрывает широкие возможности для учета эффективности взаимодействия при проектировании схем путевого развития железнодорожной инфраструктуры. На существующих схемах разработанный способ позволяет обнаружить и локализовать имеющиеся участки путей, создающие неблагоприятные условия для выполнения маневровой работы.

Возможности предложенной модели позволяют также определить размеры неблагоприятной зоны на участке пути, в пределах которой не обеспечивается эффективность сцепления вагонов (рис. 5).

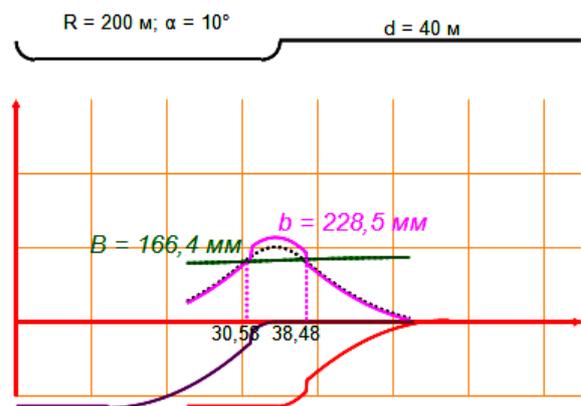


Рис. 5. Моделирование процесса взаимодействия двух четырехосных платформ для крупнотоннажных контейнеров в круговой кривой

Как видно из рис. 5, при взаимодействии двух платформ (база 19 м, консоль 3,63 м, СА-3) на участке сопряжения круговой кривой и прямого участка пути величина зоны (от 30,58 м до 38,48 м), на которой не обеспечивается эффективное взаимодействие составляет 7,9 м и заканчивается на расстоянии 3,57 м от конца кривой. При проектировании грузовых фронтов часто погрузочно-выгрузочные устройства располагаются непосредственно за кривой, что не запрещается существующими правилами и нормами проектирования. При таком размещении грузовых фронтов маневровая работа по их обслуживанию требует повышенного внимания причастных работников. Имитационным моделированием установлено, что минимальное расстояние от конца кривой радиуса  $R = 200 \text{ м}$  до крайнего положения автосцепки четырехосной длиннобазной платформы (рис. 5), размещенной у грузового фронта, ориентировочно соответствует длине ее консоли. Размещение начала грузового фронта с учетом размеров двух длин консолей от кривой, обеспечит эффективность сцепления вагонов и повысит безопасность маневровой работы на станциях.

## Результаты

Применение предложенного подхода расширяет возможности исследования условий взаимодействия вагонов на участках с различными геометрическими параметрами (табл. 1). Позволяет определить условия взаимодействия автосцепных приборов вагонов на участках сопряжения круговой кривой и прямого участка пути, когда вагон не размещается целиком на кривой ( $l_{кр} < 2l + n$ ). Появляется возможность установить ограничения на применение *s*-образных кривых с прямой вставкой и без нее.

Получены параметры кривых (длины и величины радиусов), обеспечивающих безопасность выполнения операций автоматического сцепления при выполнении маневровой работы с длиннобазными вагонами различных типов. Анализ результатов позволил определить типы длиннобазных вагонов, создающие критические условия для обеспечения сцепления вагонов. Кроме того, определены условия взаимодействия вагонов в непосредственной близости от кривых, что важно для размещения грузовых фронтон в плане.

#### **Научная новизна и практическая значимость**

Разработана имитационная модель процесса взаимодействия вагонов на участках путей различной конструкции. С ее помощью установлены некоторые ограничения на геометрию пути, обеспечивающие безопасность автоматического сцепления вагонов. Определены типы вагонов, выполнение маневров с которыми может создавать неблагоприятные условия для эффективного взаимодействия. Идентификация таких вагонов и локализация наиболее опасных участков путей на станциях позволит повысить эффективность и безопасность выполнения маневровой работы, минимизировать участие человека в сцеплении вагонов на станциях, расширить возможности применения систем автоматизации в перспективе.

Кроме того, применение требований к обеспечению автоматического сцепления вагонов гарантирует также благоприятные условия для прохода вагонов в сцепе [2], что снижает дополнительную нагрузку на элементы конструкции вагона и верхнего строения пути при движении по криволинейным участкам.

Возможности предложенной имитационной модели движения вагонов позволяют также выполнять оценку условий обеспечения габаритов приближения на железнодорожном транспорте.

#### **Выводы**

Разработанный метод целесообразно испо-

Є. А. ФЛАТОВ

## **РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПУТНІХ СТРУКТУР ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ ЗА КРИТЕРІЄМ БЕЗПЕКИ**

**Мета.** Метою дослідження є пошук і розробка універсального методу, що дозволяє розрахувати параметри путніх структур залізничних станцій за критерієм безпеки **Методика**. Встановлено, що при виконанні маневрів на станціях існує заборона на виконання автоматичного зчеплення

льзовать при проектировании и реконструкции железнодорожных станций, выполняющих маневровую работу с вагонами увеличенных линейных размеров, в том числе специализированных на обслуживании нефтеналивных, контейнерных и других грузов.

Применение имитационного моделирования, позволяет не только обнаружить и локализовать опасные участки путей, но и выделить безопасные технологические маршруты пропуска вагонов увеличенных линейных размеров по станции. Это в целом повысит безопасность маневровой работы с вагонами различных типов, ив первую очередь с длиннобазными.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Филатов, Е.А. Повышение безопасности функционирования железнодорожных станций / Е. А. Филатов // Транспортные системы и технологии перевозок. – 2017. – Вып. 13. – С. 78–83.
2. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) ГосНИИВ. – Москва : ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
3. ГОСТ 22235-2010 с изменениями. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ / Межгосударственный стандарт. – Москва : Стандартинформ, 2010.
4. Филатов, Е. А. Обеспечение безопасности перевозочного процесса при проектировании элементов плана путевого развития железнодорожных станций / Е. А. Филатов // Проблемы безопасности на транспорте : Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2017. – Ч. 1. – С. 63–64.
5. Филатов, Е. А. Требования к параметрам подвижного состава и плану железнодорожных станций/ Е. А. Филатов // Проблемы безопасности на транспорте : Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : БелГУТ, 2017. – Ч. 1. – С. 166–168.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Козаченко Д. Н. (Украина)*

Поступила в редколлегию 08.12.2017.

Принята к печати 12.12.2017.

рухомого складу при зупинці в криволінійних ділянках шляху. Це пояснюється невизначеністю ситуації в точному визначенні безпечних умов взаємодії рухомого складу. На практиці це викликає потребу контролю зчеплення вагонів причетними працівниками. Існуючі методи розрахунку дозволяють визначати умови ефективної взаємодії тільки в кругових і s-образних кривих без прямої вставки і мають ряд обмежень на застосування. Однак, проведений аналіз схеми колійного розвитку станцій дозволив виділити майже два десятка досить поширених розрахункових умов взаємодії. Найбільш доступним і універсальним способом, що забезпечує близьке до експерименту результат, є імітаційне моделювання процесу зчеплення рухомого складу на ділянках шляхів різної конфігурації. Для створення моделі необхідно реалізувати алгоритм, що включає рішення ряду завдань: 1) створення математичної моделі досліджуваного ділянки шляху; 2) моделювання положення взаємодіючих вагонів та їх консолей в будь-якій точці досліджуваного ділянки шляху; 3) визначення траєкторій руху осей зчеплення автозчеплень вагонів і ліній, що характеризує відстань між осями зчеплення вагонів (сумарний винос консолей), а також величини ефективної ширини захвату автозчеплень в залежності від геометрії шляху; 4) моделювання умов взаємодії двох вагонів та визначення ефективності автоматичного зчеплення. **Результати.** Застосування комп'ютерного імітаційного моделювання дозволяє значно розширити можливості дослідження умов взаємодії вагонів на ділянках з різними геометричними параметрами. Так, визначено умови та характер процесів взаємодії автозчепних приладів вагонів (на прикладі довгобазної платформи довжиною 26,22 м) на ділянках сполучення кругової кривої з прямою і s-подібної кривої без прямої вставки, коли вагон не розміщується цілком на кривій ( $l_{кр} < 2l + n$ ). Метод дозволяє визначати обмеження на застосування s-образних кривих з прямою вставкою. В результаті моделювання отримані довжини і величини радіусів кривих, що забезпечують ефективність виконання операцій автоматичного зчеплення з довгобазними вагонами. Встановлено, що конструкція і розміри деяких довгобазних вагонів не забезпечують умов зчеплення на стрілочних переводах марок 1/6 й 1/9. Такі вагони доцільно виділяти в окрему категорію понаддовгобазних, для застосування в маневровій роботі з ними відповідних заходів безпеки. Крім того, визначені розміри зони, в межах якої забезпечуються умови взаємодії вагонів, що важливо для розміщення вантажних фронтів та інших споруд у прив'язці до плану колійного розвитку. **Наукова новизна.** Розроблена імітаційна модель процесу взаємодії вагонів на ділянках шляхів різної конструкції. При цьому облік додаткового поперечного зсуву виконується при визначенні координат кожної візки окремо. Її комп'ютерна реалізація дозволяє досліджувати параметри шляхових структур залізничних станцій та встановлювати вимоги до конструкції і геометричним параметрам шляхи, що забезпечують ефективність зчеплення вагонів. Встановлені деякі типи вагонів, виконання маневрів з якими може створювати критичні умови взаємодії. **Практична значимість.** Формалізація умов, що створюють обмеження на виконання маневрових операцій дозволяє ідентифікувати вагони, що створюють несприятливі умови взаємодії, локалізувати найбільш небезпечні ділянки колій на станціях та виділити безпечні технологічні маршрути пропуску довгобазних вагонів. Використання результатів моделювання при проектуванні і реконструкції залізничних станцій дозволить мінімізувати участь людини в процесі зчеплення вагонів, підвищити ефективність та безпеку виконання маневрової роботи, розширити можливості застосування систем автоматизації в перспективі. Розроблена імітаційна модель дозволяє також виконувати оцінку умов забезпечення габаритів наближення на залізничному транспорті.

*Ключові слова:* довгобазні вагони, геометричні параметри елементів колійного розвитку, імітаційне моделювання, безпека взаємодії вагонів.

E. FILATOV

## CALCULATION OF PARAMETERS OF RAILWAY STRUCTURES OF RAIL STATIONS ON THE SAFETY CRITERIA

**Purpose.** The aim of the research is to search for and develop a universal method that allows calculating the parameters of railroad tracks in railway stations by the safety criterion. **Technique.** It is established that when performing maneuvers at stations, there is a prohibition on the automatic coupling of the rolling stock when it stops in curved sections of the track. This is due to the prevailing uncertainty in the precise definition of the safe conditions for the interaction of rolling stock. In practice, this causes the need to monitor the process of cohesion of wagons

involved employees. The existing methods of calculation make it possible to determine the conditions for effective interaction only in circular and s-shaped curves without a straight section and have a number of limitations on the application. However, the conducted analysis of the circuits of the track development of existing stations made it possible to allocate almost two dozen fairly common design interaction conditions. The most accessible and universal way, providing a result close to the experiment, is the simulation of the process of cohesion of rolling stock on sections of paths of different configurations. To create a model, it is necessary to implement an algorithm that includes the solution of a number of problems: 1) the creation of a mathematical model of the path section under study; 2) simulation of the position of the interacting cars and their consoles at any point of the investigated section of the track; 3) determination of the trajectories of the axes of coupling of the automatic couplings of wagons and lines, characterizing the distance between the axle of coupling of cars (total removal of consoles), as well as the effective gripping width of automatic couplings, depending on the geometry of the track; 4) simulation of the conditions of interaction between two cars and determining the effectiveness of automatic coupling.

**Results.** The use of computer simulation allows significantly expanding the possibilities of investigating the conditions for the interaction of wagons on sections with different geometric parameters. Thus, the conditions and the character of the interaction processes of the automatic couplers of wagons (on the example of a long-platform platform with a length of 26,22 m) are defined on the sections of conjugation of a circular curve with a straight and s-shaped curve without a straight insertion, when the wagon is not placed entirely on the curve ( $l_c < 2l + n$ ). The method makes it possible to determine the restrictions on the use of s-shaped curves with direct insertion. As a result of the simulation, the lengths and sizes of the radii of the curves are obtained, which ensure the efficiency of performing automatic clutch operations with long-wheel wagons. It is established that the design and dimensions of some long-wheelbase wagons do not provide the conditions of adhesion on the switches of grades 1/6 and 1/9. Such wagons should be allocated to a separate category of extra-long-wheelbase, for the use of appropriate security measures in the shunting work with them. In addition, the size of the zone is determined, within which the conditions for the interaction of wagons are not ensured, which is important for placing freight fronts and other structures in connection with the railroad development plan.

**Scientific novelty.** An imitating model of the process of interaction of wagons on sections of paths of various designs has been developed. In this case, the additional transverse displacement is taken into account when determining the coordinates of each trolley separately. Its computerization allows to investigate the parameters of railway structures and to establish the requirements for the design and geometric parameters of the track, which ensure the effectiveness of the cohesion of the wagons. Some types of wagons have been established, the execution of maneuvers with which can create critical conditions for interaction.

**Practical importance.** Formalization of the conditions creating restrictions on the performance of shunting operations makes it possible to identify wagons that create unfavorable conditions for interaction, to localize the most dangerous sections of tracks at stations and to allocate safe technological routes for skipping long-distance wagons. The use of simulation results in the design and reconstruction of railway stations will minimize the participation of a person in the process of coupling cars, improve the efficiency and safety of shunting operations, and extend the use of automation systems in the future. The developed simulation model also makes it possible to perform an assessment of the conditions for ensuring safe approach gauge in railway transport.

*Keywords:* long-wheelbase wagons, geometric parameters of the elements gridiron, imitation simulation, safety of the cohesion of the wagons.