

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ И ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Филатов Е.А.

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

Аннотация. В статье представлены результаты исследований взаимного влияния параметров путевого развития и подвижного состава на безопасность маневровой работы. Разработанная имитационная модель позволяет осуществить переход от экспертно-аналитических подходов к теоретически обоснованным решениям и может стать важной составляющей цифровой модернизации существующей технологии маневровой работы.

Ключевые слова. Безопасность взаимодействия, параметры путевого инфраструктуры, вагон увеличенных размеров, автоматическое сцепление, движение в сцепе.

SAFETY OF RAILWAY STATIONS AND ROLLING STOCK TRACK INFRASTRUCTURE INTERACTION

Filatov E.A.

Belarusian State University of Transport, Gomel, Republic of Belarus

Abstract. The article presents the results of studies of the mutual influence of track development parameters and rolling stock on the safety of shunting operations. The developed simulation model makes it possible to make a transition from expert-analytical approaches to theoretically substantiated solutions and can become an important component of the digital modernization of the existing shunting operation technology.

Keywords. Interaction safety, track infrastructure parameters, oversized car, automatic coupling, movement in coupling.

Внедрение цифровых технологий на железнодорожном транспорте сопровождается повышением доли автоматизации основных эксплуатационных процессов, выполняющихся с высокой степенью участия человека. Это приводит к тесному сплетению эксплуатационных задач, традиционно решавшихся узкими специалистами в конкретной сфере деятельности, и задач автоматизации, связанных с внедрением цифровых технологий, решаемых специалистами IT-сферы. Такая трансформация традиционных подходов к решению задач эксплуатации железнодорожного транспорта требует от специалистов-железнодорожников их предварительной подготовки, систематизации и алгоритмизации, перехода от эмпирических способов решения к аналитическим и алгоритмическим подходам.

Одной из актуальных проблем эксплуатации железнодорожного транспорта является обеспечение безопасности взаимодействия путевого инфраструктуры и подвижного состава. Решение этой задачи формировалось и корректировалось на протяжении всего периода развития железных дорог и на сегодня представляет собой синтез эмпирических и аналитических подходов. Основным фактором, формирующим проблему взаимодействия является стремление увеличить массу и длину поездов. Это вызывает необходимость решения множества задач, связанных с увеличением мощности локомотивов, ростом грузоподъемности и грузоместимости подвижного состава, адаптацией к изменению нагрузок на путевую инфраструктуру. С учетом сложившихся мировых тенденций, можно говорить об устойчивом тренде увеличения массы и длины поездов в дальнейшей перспективе, а следовательно

увеличении грузоподъемности и размеров вагонов. На рисунке 1 показана динамика изменения допустимой осевой нагрузки вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 мм по годам с изображением аппроксимирующей кривой и границ значимости.

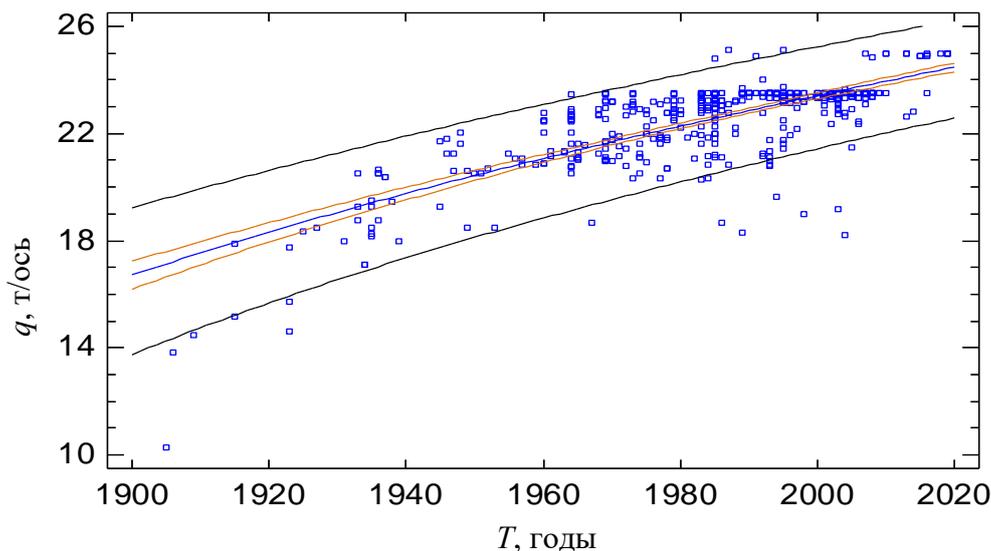


Рис. 1 – Графическое изображение аппроксимации временного ряда изменения осевой нагрузки грузовых вагонов колеи 1520 мм

В показанную выборку не включена часть вагонов, выпускаемых для промышленных предприятий, а также имеющих низкую степень использования грузоподъемности. Это позволило получить модель поведения данных с достаточно высокими статистическими параметрами значимости (модель $q = (5655,44 - 10214600/T)^{0,5}$; $r = -0,78$; $R^2 = 61\%$). Полученная модель подтверждает устойчивый тренд увеличения осевой нагрузки вагонов по годам за более чем вековой период. Аналогичные исследования изменения длины подвижного состава позволили определить средний темп её увеличения, равный около метра за 10 лет, а по отдельным типам вагонов до 1,7 м. Сопоставляя уже достигнутые величины осевой нагрузки на пространстве СНГ с осевыми нагрузками на железных дорогах Китая, США и Австралии, можно сделать вывод о высокой вероятности дальнейшего роста осевой нагрузки в перспективе.

Из вышесказанного следует, что задача обеспечения безопасного взаимодействия параметров транспортной инфраструктуры и подвижного состава не может иметь окончательного решения, полученного опытным путем. Для обеспечения своевременной адаптации параметров путевой инфраструктуры и обслуживаемого вагонопотока требуется разработка универсального аналитического подхода, позволяющего выполнять оценку изменения параметров взаимодействия в реальных эксплуатационных условиях с учетом возможности его применения в автоматизированных системах управления на железнодорожном транспорте.

В данной работе представлены результаты исследований условий взаимодействия путевой инфраструктуры железнодорожных станций и подвижного состава в горизонтальной плоскости, обусловленные конструкционными возможностями механизма автосцепки. Преодоление криволинейных участков ограничивается гибкостью автосцепки при движении вагонов в сцепе, а также при автоматическом сцеплении. Кроме того в кривых увеличиваются отклонения контрольных точек подвижного состава от оси пути, что ограничивает применяемые на железнодорожном транспорте габариты. Особенно актуальны данные исследования для обеспечения безопасности выполнения маневровой работы на участках кривых и стрелочных переводов, при движении по которым сцепленных вагонов в ударно-тяговых механизмах вагонов возникают дополнительные поперечные силы. Это связано с

взаимным отклонением продольных осей сцепленных вагонов, из-за чего их автосцепные приборы стремятся занять перекошенное относительно друг друга положение. И чем больше взаимное смещение продольных осей вагонов, тем больше поперечные усилия в узлах автосцепного механизма. При этом автосцепка может занимать четыре положения: перекошенное и не перекошенное положение тягового хомута с учетом нормального или заглубленного положения автосцепки. Заглубленное положение автосцепки наблюдается при достаточном сжатии сцепных приборов и обеспечивает наименьший угол отклонения автосцепки γ (особенно без перекоса тягового хомута). Таким образом, наихудшие условия взаимодействия возникают при маневрах на криволинейных участках пути, сопровождающихся сжатием автосцепных приборов (например, при движении вагонами вперед).

На станциях наименьшие величины радиусов кривых применяются в стрелочных горловинах, в первую очередь – горочных. Поэтому выполнение маневровой работы в таких зонах создает наибольшие технологические риски. При движении в кривых происходит повышенный износ взаимодействующих элементов: в контуре зацепления, в зоне контакта корпуса автосцепки и окна ударной розетки, в зоне работы клина тягового хомута. В конечном итоге это приводит к появлению неисправностей соответствующих элементов конструкции вагона, увеличивает энергетические потери на работу автосцепки и движение вагонов. При достижении предельных углов отклонения автосцепки возникающие боковые силы оказывают воздействие на кузов вагона, стремясь изменить его положение, что создает дополнительные боковые нагрузки в зоне контакта «колесо – рельс», приводящие к их повышенному износу, особенно при движении по *s*-образным кривым и вагонами вперед. Показанные явления увеличивают сопротивление движению и являются источниками дополнительного шума. Таким образом, определение параметров плана путевого развития, обеспечивающих эффективное движение в сцепе, является актуальной эксплуатационной задачей, не только повышающей безопасность взаимодействия, но и комплексно улучшающей качество перевозочного процесса.

Кроме того, автором исследованы эксплуатационные процессы, связанные с автоматическим сцеплением вагонов. Данная операция массово выполняется при формировании и расформировании поездов, обслуживании грузовых фронтов и др. Маневры со сцеплением в таких случаях часто выполняется в пределах стрелочных горловин, в которых сконцентрировано наибольшее количество кривых и стрелочных переводов. Центрирующий механизм автосцепок большинства вагонов обеспечивает эффективное сцепление вагонов на прямолинейных участках. Однако при расположении вагонов в кривой продольная ось вагона смещается относительно оси пути, и центрирующий механизм обеспечивает соответствующее отклонение оси автосцепки от оси пути в наружную сторону кривой. При расположении сцепляемых вагонов в *s*-образных кривых оси сцепления автосцепок, имеют наибольшие взаимные отклонения. Допустимое горизонтальное смещение стандартной автосцепки при автоматическом сцеплении составляет 175 мм. Разработаны и другие конструкции ударно-тяговых механизмов с увеличенными углами отклонения и поворачивающим механизмом, однако они не получили широкого распространения. В *s*-образных и круговых кривых малых радиусов горизонтальное смещение автосцепок может превышать допустимое, что приводит к соударению зубьев автосцепки нерабочими гранями (рисунок 2). При низкой скорости сцепления легковесных вагонов, когда автосцепки ударяются или заклинивают нерабочими гранями увеличивается износ, появляются деформации и повреждения узлов автосцепного механизма. При предельном износе хвостовик может изгибаться и при достаточно большой скорости и массе вагонов, например, при роспуске с горки, это может приводить к серьезным поломкам автосцепного устройства, выдавливанию колесных пар и даже сходом вагонов. Поэтому маневры со сцеплением вагонов должны выполняться под контролем причастного работника. Однако, этим требованиям нельзя в полной мере обеспечить при роспуске с горки, когда вагоны свободно скатываются на пути сортировочного парка. Эти ограничения

ухудшают условия труда персонала, увеличивают продолжительность маневров и сдерживают «цифровую модернизацию» существующей технологии маневровой работы.



Рис. 2 – Ненормативное взаимодействие автосцепок в кривых участках

Показанные нарушения условий взаимодействия при маневровых передвижениях сцепленных вагонов и автоматическом сцеплении, в той или иной степени встречаются в эксплуатационной работе многих железнодорожных станций. Анализ факторов актуализации проблемы взаимодействия путевого развития и подвижного состава на современном этапе позволил выявить ряд устойчивых тенденций, оказывающих на нее комплексное влияние.

Важной причиной, маскирующей развитие проблемы взаимодействия, является автономность подходов к ее решению в различных сферах эксплуатации железнодорожного транспорта: при проектировании путевого развития и подвижного состава, расчетах габаритов приближения строений, подвижного состава и погрузки. В указанных сферах учитываются основные факторы, определяющие эффективность взаимодействия: радиусы кривых, длины вагонов, особенности конструкции автосцепки и тележечного подвешивания. Однако величины ограничений существенно отличаются, что зафиксировано в соответствующих ведомственных нормативах. Так ограничения длин расчетных вагонов в зависимости от сферы деятельности изменяются в пределах от 17 до 24 м по осям автосцепок. В качестве расчетных схем путевого развития используются круговые кривые с радиусами 150–350 м и *s*-образные кривые с радиусами 480–500 м [1]. Также отличаются и величины смещения вагонов при движении расчетным участкам пути, учитывающие степень износа колеса и рельса, особенности конструкций тележек и их хордовое смещение. В такой ситуации специалисты и проектировщики проявляют «ведомственный подход», опираясь на собственные нормативы, не гармонизированные между собой. Например, согласно норм проектирования грузовых вагонов увеличенных линейных размеров автоматическое сцепление при проектировании обеспечивается для радиусов 480 м. В то же время нормы проектирования железнодорожных станций допускают применение радиусов 200 м без ограничений по размерам вагонов. Сложившаяся ситуация требует разработки единого подхода и устранения сложившихся противоречий.

Как уже говорилось выше, параметры расчетного вагонопотока, применяемые в различных сферах железнодорожной деятельности весьма разнообразны. При этом, действующая на железнодорожном транспорте документация содержит схожие и даже одинаковые понятия, однако имеющие различную трактовку. Так, согласно ПТЭ [2] «длиннобазным», считается вагон, имеющий расстояние между центрами осей внутренних колесных пар более 11,3 м. При этом согласно ГОСТ 10935-2019 [3]) длиннобазным считается

грузовой вагон, длина которого по осям сцепления автосцепок превышает 19,6 м. Другим стандартом [4] определено понятие «*длиннобазный крытый вагон*» – вагон, длина которого по осям сцепления более 21 м. Аналогичное понятие применяется в ряде нормативных документов в области проектирования и эксплуатации вагонов [5, 6]. Так, к «*вагонам с увеличенными линейными размерами*» относятся грузовые, изотермические, специальные вагоны (машины для обслуживания пути, транспортеры и т. п.) с длиной по осям сцепления более 21 м. При выполнении габаритных расчетов вводится понятие «*расчетный вагон*» – условный вагон, имеющий расстояние между направляющими сечениями 17 м и длину кузова 24 м [7]. Показанные разногласия в определении параметров вагонов с ограничениями по длине в различных технологических сферах железнодорожного транспорта затрудняют точную идентификацию критических условий эксплуатации подвижного состава увеличенных размеров.

Как уже было сказано длины выпускаемых вагонов с течением времени увеличиваются, что приводит к пропорциональному росту величины консоли и соответственно ее выносу в кривой. В тоже время существует тенденция увеличения минимально допустимых радиусов кривых и длин прямых вставок, что наоборот уменьшает величину выноса консоли. Однако несогласованность этих процессов привела к тому, что темп увеличения размеров подвижного состава заметно превышает темп снижения криволинейности путевого развития по степени влияния на процессы взаимодействия. Итоговый вынос консоли постепенно увеличивался в среднем на 6-7% за десять лет в исследуемом периоде, и с момента внедрения автосцепного механизма составил около 40%.

Кроме того, становление современной сети железных дорог сопровождалось увеличением количества путей на станциях и соответствующим усложнением схем стрелочных горловин. В некоторых случаях этот процесс приводил к широкому применению минимальных радиусов кривых и увеличению их количества в 2-4 раза, росту количества s-образных кривых в 5-13 раз.

Анализ ряда современных стрелочных горловин с количеством сортировочных путей от 16 до 21 позволил установить, что в среднем на один путь приходится более 4 кривых и 4 стрелочных переводов. Более 40% кривых являются s-образными и практически половина образована с участием стрелочных переводов. Кроме того, в исследуемых горловинах более 20% кривых имеют радиусы менее 200 м.

Исследование выборок расформируемых грузовых вагонов по длине, показали, что на горках в течение суток может перерабатываться 5–10% вагонов с ограничениями по длине.

Изучение сложившихся подходов к определению основных случаев взаимодействия выявило отсутствие системного подхода при их определении. Поэтому на основе анализа конструкций стрелочных горловин и вариантов размещения на них вагонов предложена классификация условий взаимодействия подвижного состава и путевого развития, в основу которой положены 25 наиболее распространенных схем взаимодействия (таблица 1). Представленные схемы описывают наиболее характерные случаи взаимодействия элементов горловин и подвижного состава. При этом детальный анализ размещения вагонов на схемах показывает, что они должны быть дополнительно исследованы для поиска максимального взаимного отклонения консольных частей вагонов и границ расположения опасной зоны.

Автором проанализированы существующие способы определения условий взаимодействия. Установлено, что их применение для определения результатов сцепления возможно путем последовательного пересчета положения подвижного состава относительно оси пути (более 70% расчетных случаев). Однако данный способ предполагает дискретный расчет параметров взаимодействия для конкретной точки пути. Для оценки рисков в пределах одной схемы взаимодействия с шагом, обеспечивающим достаточную точность, необходимо выполнить серию до 500 расчетов. Количество схем взаимодействия в пределах всей стрелочной горловины может достигать 100 случаев. Такая трудоемкость делает его применение нецелесообразным.

Таблица 1 – Характеристика схем взаимодействия элементов стрелочных горловин и подвижного состава

№ схемы	Элемент путевого развития	Описание взаимного расположения элементов схемы и вагона	Схема взаимодействия
1	2	3	4
1	<i>Однонаправленные сочетания элементов (круговые конструкции)</i>		
1.1	Одинокная кривая	вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k$ ось сцепления: $n_{1,2} \in k$ вагон № 2: $(t_{21}, t_{22}) \in k$	
1.2	Сопряжение кривой и прямой	вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k, d\}$; вагон № 2: $(t_{21}, t_{22}) \in d$	
		вагон № 1: $t_{11} \in d_1, t_{12} \in k$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k, d_2\}$; вагон № 2: $(t_{21}, t_{22}) \in d_2$	
1.3	Составные круговые кривые	вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k_1, k_2\}$; вагон № 2: $(t_{21}, t_{22}) \in k_2$	
		вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k_1, k_2\}$; вагон № 2: $t_{21} \in k_2, t_{22} \in d$	
		вагон № 1: $t_{11} \in d_1, t_{12} \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k_1, k_2\}$; вагон № 2: $t_{21} \in k_2, t_{22} \in d_2$	
1.4	Составные круговые кривые с прямой вставкой	вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d$ ($l_d \leq n_1 + n_2$); вагон № 2: $(t_{21}, t_{22}) \in k_2$	
		вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k_1, d\}$; вагон № 2: $t_{21} \in d, t_{22} \in k_2$	
		вагон № 1: $t_{11} \in k_1, t_{12} \in d$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d$ ($l_d \geq n_1 + n_2$); вагон № 2: $t_{21} \in d, t_{22} \in k_2$	
1.4.4	Составные круговые кривые с прямой вставкой	вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d_1$ ($l_d \leq n_1 + n_2$); вагон № 2: $t_{21} \in k_2, t_{22} \in d_2$	
		вагон № 1: $t_{11} \in d_1, t_{12} \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d_2$ ($l_d \leq n_1 + n_2$); вагон № 2: $t_{21} \in k_2, t_{22} \in d_3$	

Продолжение таблицы 1			
1	2	3	4
2	Разнонаправленные сочетания элементов (<i>s</i> -образные конструкции)		
2.1	2.1.1	вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k_1, -k_2\}$; вагон № 2: $(t_{21}, t_{22}) \in -k_2$	
	2.1.2	вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k_1, -k_2\}$; вагон № 2: $t_{21} \in -k_2, t_{22} \in -d$	
	2.1.3	вагон № 1: $t_{11} \in d_1, t_{12} \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k_1, -k_2\}$; вагон № 2: $t_{21} \in -k_2, t_{22} \in -d_2$	
2.2	2.2.1	вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d$ ($l_d \leq n_1 + n_2$); вагон № 2: $(t_{21}, t_{22}) \in -k_2$	
	2.2.2	вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d$; вагон № 2: $t_{21} \in d, t_{22} \in -k_2$	
	2.2.3	вагон № 1: $t_{11} \in k_1, t_{12} \in d$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d$ ($l_d \geq n_1 + n_2$); вагон № 2: $t_{21} \in d, t_{22} \in -k_2$	
	2.2.4	вагон № 1: $(t_{11}, t_{12}) \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d_1$ ($l_d \leq n_1 + n_2$); вагон № 2: $t_{21} \in -k_2, t_{22} \in -d_2$	
	2.2.5	вагон № 1: $t_{11} \in d_1, t_{12} \in k_1$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d_2$ ($l_d \leq n_1 + n_2$); вагон № 2: $t_{21} \in -k_2, t_{22} \in -d_3$	
2.3	2.3.1	вагон № 1: $t_{11} \in k_1, t_{12} \in k_2$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k_2, -k_3\}$; вагон № 2: $t_{21} \in -k_3, t_{22} \in -k_4$	
	2.3.2	вагон № 1: $t_{11} \in k_1, t_{12} \in k_2$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k_2, -k_3\}$; вагон № 2: $t_{21} \in -k_3, t_{22} \in -d$	
	2.3.3	вагон № 1: $t_{11} \in d_1, t_{12} \in k_2$; ось сцепления: $n_{1,2} \in \{k_2, -k_3\}$; вагон № 2: $t_{21} \in -k_3, t_{22} \in -d_2$	

2.4	2.4.1	Составные s-образные кривые с прямой вставкой	вагон № 1: $t_{11} \in k_1, t_{12} \in k_2$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d$; вагон № 2: $t_{21} \in -k_3, t_{22} \in -k_4$		
Окончание таблицы 1					
		1	2	3	4
2.4	2.4.2	Составные s-образные кривые с прямой вставкой	вагон № 1: $t_{11} \in k_1, t_{12} \in k_2$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d$; вагон № 2: $t_{21} \in d, t_{22} \in (-k_3 \vee -k_4)$		
	2.4.3		вагон № 1: $t_{11} \in (k_1 \vee k_2), t_{12} \in d$; ось сцепления: $n_{1,2} \in d (l_d \geq n_1 + n_2)$; вагон № 2: $t_{21} \in d, t_{22} \in (-k_3 \vee -k_4)$		
Примечание – k – кривая радиуса R; d – прямой участок; «←» – противоположное направление примыкания элемента по отношению к первому; {k, d}, {k1, k2} – сопряжение элементов схемы; t11, t12, t21, t22 – передняя и задняя тележки первого и второго вагонов соответственно; n1,2 – ось сцепления автосцепок; 2l – длина базы вагона; n1, n2 – длины консолей вагонов.					

Для ряда случаев взаимодействия автором были предложены аналитические выражения для быстрого расчета критических параметров путевого развития [8–10]: при сцеплении в зоне сопряжения кривой и прямой с полным и частичным расположением вагонов на расчетных участках (случай 1.2, таблица 1), для сопряжения в s-образной кривой с полным и частичным расположением на ней вагонов без прямой вставки и при ее наличии (случаи 2.1 и 2.2). Однако данный подход позволяет определять результаты взаимодействия только в 30% расчетных случаев.

Выполненные исследования процессов взаимодействия путевого развития с вагонами, перемещаемыми в сцепе позволили получить расчетные выражения для определения величин допустимых радиусов криволинейных участков пути [8]. С их помощью произведена комплексная оценка параметров взаимодействия при маневровой работе, выполнено сравнение допустимых величин радиусов при автоматическом сцеплении в круговой и s-образной кривых и при движении в сцепе с нормальным и заглубленным положениями автосцепок. В результате установлено, что предельные ограничения, обеспечивающие взаимодействие подвижного состава и путевого развития при автоматическом сцеплении, более чем в два раза превышают ограничения при маневрах со сцепленными вагонами. Поэтому, в качестве расчетного критерия взаимодействия принято условие автоматического сцепления [10].

Для детального исследования условий взаимодействия во всех расчетных случаях, в том числе не представленных в таблице 1, требуется применение более универсального подхода, обеспечивающего близкий к практике результат. Таким свойством обладает метод моделирования взаимодействия путевого развития и подвижного состава. Для его реализации разработан алгоритм, включающий решение ряда задач: 1) создание математической модели схемы путевого развития; 2) моделирование положения вагонов и их консолей в любой точке схемы; 3) определение траекторий движения контрольных точек вагонов и линий, характеризующих суммарный вынос консолей и эффективную ширину захвата автосцепок; 4) графическая интерпретация параметров взаимодействия, оценка выполнения установленного критерия технической совместимости схем путевого развития и подвижного состава.

Реализация рассмотренного алгоритма в виде программы (рисунок 3) значительно упрощает вычисления и позволяет моделировать условия взаимодействия для схем высокой степени сложности. Полученные результаты взаимодействия представляются в виде специального графика с различным масштабом по осям: ось абсцисс характеризует развернутую длину пути l_p ; ось ординат определяет смещение осей сцепления автосцепок относительно оси пути $b_{см}$ и эффективную ширину захвата B_3 в соответствующей точке (рисунок 4).

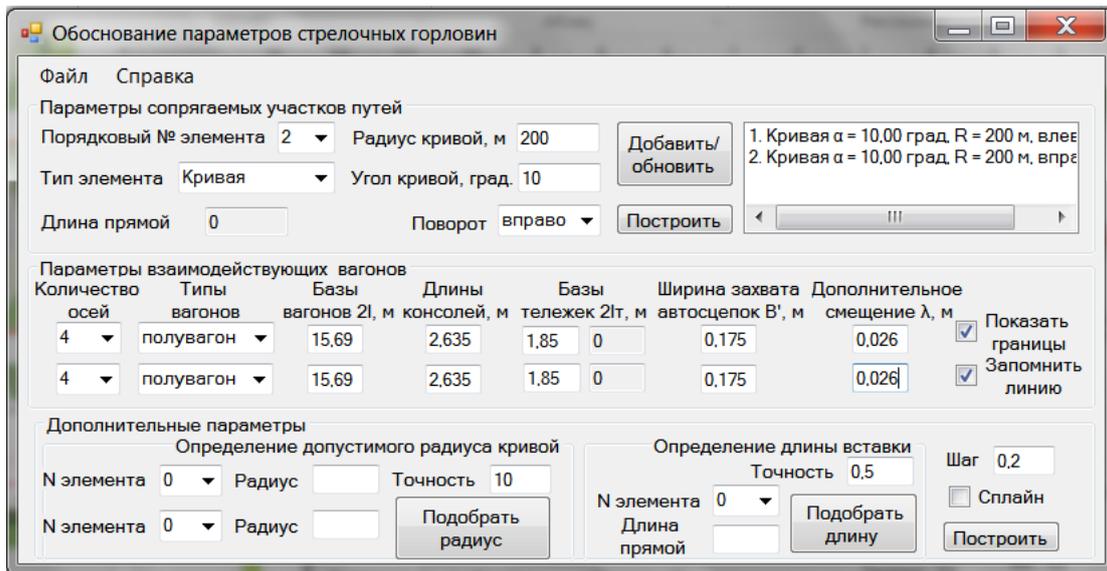


Рис. 3 – Окно ввода исходных условий взаимодействия подвижного состава и путевого развития

На рисунке 4 показан пример графической интерпретации результатов взаимодействия крытых вагонов модели 11-835 с круговой кривой радиуса 200 м (случай 1.2.1) и *s*-образной кривой с радиусами 200 м (случай 2.1.1). Линии 1 и 2 на рисунке 4 описывают траектории движения автосцепок первого и второго вагонов. Изменение суммарного выноса консольных частей вагонов $b_{см}$ с учетом дополнительного поперечного смещения λ наружу кривой описывается линией 3, а без него – пунктирной линией 4. Линия 5 показывает изменение эффективной ширины захвата автосцепки. Так как положение линии 4 выше линии 5, то безопасность взаимодействия вагонов с одиночной (рисунок 1, *a*) и *s*-образной кривыми (рисунок 1, *б*) не обеспечивается. Также можно оценить степень этого несоответствия для круговой кривой ($\Delta = 44,5$ мм) и *s*-образной ($\Delta = 247$ мм).

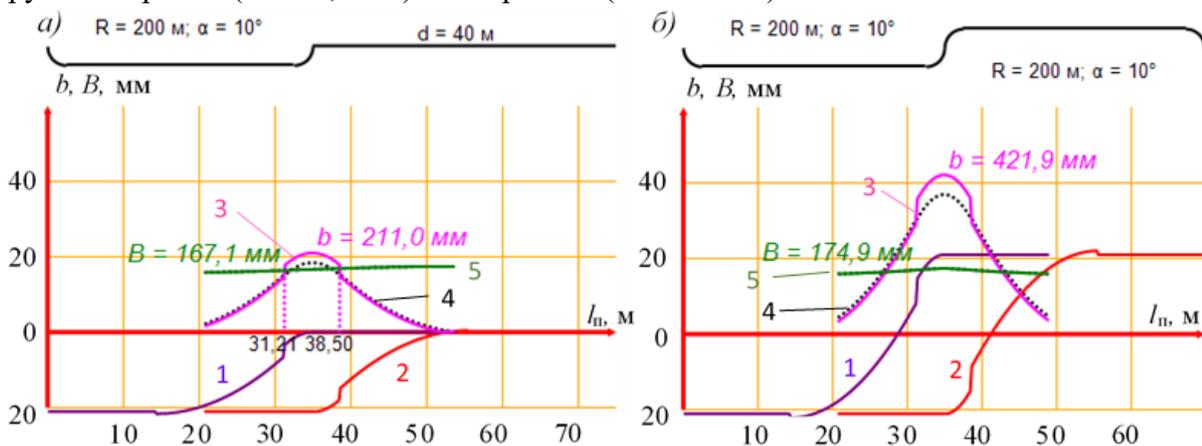


Рис. 4 – Графическая интерпретация взаимодействия крытых вагонов модели 11-835 с круговой (а) и *s*-образной (б) кривыми радиусов 200 м

Представленный способ позволяет исследовать условия взаимодействия в случаях, где не разработаны другие способы решения: при сцеплении между собой вагонов различных конструкций, при размещении вагона одновременно на нескольких конструктивных элементах путевого развития, для поиска наихудших условий взаимодействия. Кроме того, представленный метод позволяет определять расположение неблагоприятных зон в исследуемых стрелочных горловинах, что важно для их пространственной локализации на станциях. Как видно из рисунка 1, *a*, в зоне сопряжения кривой и прямой безопасность маневровой работы с четырехосными платформами для крупнотоннажных контейнеров не

обеспечивается на протяжении 7,29 м (от 31,21 до 38,50 м). Такие расчеты актуальны и при размещении грузовых фронтов, которые допускается проектировать непосредственно за кривой.

Разработанная модель позволила выполнить анализ существующих требований к проектированию на предмет обеспечения безопасности взаимодействия. На основе выявленных несоответствий, предложены дополнительные ограничения, обеспечивающие возможность устранения проблем взаимодействия на практике [11].

Моделирование условий взаимодействия с вагонами различных типов, а также анализ природы возникновения и тенденции развития технологических систем железнодорожного транспорта позволил определить в качестве расчетного вагона увеличенных размеров – вагон, длиной по осям сцепления более 21 м либо с длиной консольной части более 4 м.

Оценка наиболее массовых схем взаимодействия с одиночными круговыми кривыми радиусов 200 м и одиночными стрелочными переводами подтвердила безопасность их применения со всеми расчетными вагонами.

Исследованиями установлено, что наихудшие условия взаимодействия создаются в пределах *s*-образных кривых без вставки (случай 2.1). Для обеспечения безопасности взаимодействия радиусы таких кривых должны составлять 390 м и 450 м для вагонов массовых типов и увеличенных размеров соответственно. Выявлено, что ограничение длины кривой повышает эффективность взаимодействия. Определены зависимости между длинами кривых $l_{кр}$, составляющих *s*-образную, и их радиусом R :

- для вагонов массовых типов $l_{кр} = e^{0,947947 + 0,00435352R}$, $RC[140; 385]$;

- для вагонов увеличенных размеров $l_{кр} = e^{1,00537 + 0,00389576R}$, $RC[140; 448]$.

Наличие прямой вставки в *s*-образных кривых позволяет повысить качество взаимодействия с подвижным составом. Исследования таких кривых позволило установить, что наличие вставки 6,25 м обеспечивает безопасность взаимодействия при радиусах 250 и 300 м для вагонов массовых типов и увеличенных размеров, а вставки длиной 12,5 м и 15 м обеспечивают взаимодействие соответствующих расчетных вагонов при радиусе 200 м. Аналогичные *s*-образные кривые создаются при взаимном размещении стрелочных переводов, особенно с крестовинами марки 1/6 симметричная. В таких случаях размеры вставок изменяются в пределах 5–12,5 м [11].

Анализ конструкций стрелочных горловин позволил выделить в отдельную расчетную группу схемы взаимного расположения стрелочных переводов и закрестовинных кривых с вставками и без них. Установлено, что наихудшие условия создаются при применении симметричных стрелочных переводов с крестовиной марки 1/6 симметричная. Так как в таких сочетаниях можно изменять только радиус закрестовинной кривой (параметры стрелочных переводов фиксированы), то для безопасного взаимодействия его величина должна быть 530–1330 м соответственно. На практике такие условия практически недостижимы. В таких сочетаниях проектирование прямых вставок 6,25–15 м позволяет обеспечить эффективные режимы взаимодействия. Для расположения стрелочных переводов марки 1/6 симметричная и закрестовинных кривых для различных сочетаний кривых радиуса R с прямой вставкой d получены следующие зависимости:

- для вагонов массовых типов $R = 878,632 - 310,35 \ln d$, $dC[3; 9,5]$;

- для вагонов увеличенных размеров $R = 2237,34 - 780,662 \ln d$, $dC[3; 13,9]$.

По результатам моделирования условий взаимодействия получен и ряд других зависимостей и ограничений в полной мере показанных в [9, 11].

Выполненная систематизация исследований прошлых лет позволила классифицировать основные случаи взаимодействия, установить критерии расчета, определить наиболее критические параметры этого процесса, исследовать и дополнить существующие нормы проектирования с учетом практики их применения. Выполненная работа является важным этапом на пути модернизации существующей технологии

выполнения маневров на железнодорожном транспорте и может служить примером цифровой трансформации подходов к решению существующих эксплуатационных задач.

Список литературы

1. Филатов, Е.А. Комплексное обоснование параметров путевого развития железнодорожных станций и геометрических размеров подвижного состава / Е.А. Филатов // Транспортные системы и технологии перевозок : сб. науч. тр. Днепров. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепр : ДНУЖТ, 2018. – Вып. 16. – С. 93–101.
2. Правила технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь : утв. постановлением М-ва трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь от 25.11.2015 г. № 52 [Электронный ресурс] / Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь, 23.01.2016, 8/30414.
3. ГОСТ 34530-2019. Транспорт железнодорожный. Основные понятия. Термины и определения. Межгосударственный стандарт. – М. : Стандартинформ, 2019. – 50 с.
4. ГОСТ 10935-2019. Вагоны грузовые крытые. Общие технические условия Межгосударственный стандарт. – М. : Стандартинформ, 2019. – 16 с.
5. ГОСТ 22235–2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ. – М. : Стандартинформ, 2011. – 19 с.
6. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ, ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
7. ГОСТ 9238–2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. – М. : Стандартинформ, 2014. – 172 с.
8. Филатов, Е.А. Обеспечение безопасности при проектировании круговых кривых на железнодорожных станциях / Е.А. Филатов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2019. – С. 84–86.
9. Филатов, Е.А. Обоснование технической совместимости горловин железнодорожных станций и подвижного состава / Е.А. Филатов // Транспортные системы и технологии перевозок : сб. науч. тр. Днепров. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепр : ДНУЖТ, 2020. – Вып. 19. – С. 25–36.
10. Филатов, Е.А. Влияние s-образных кривых на безопасность эксплуатационной работы / Е.А. Филатов // Тихомировские чтения: Синергия технологии перевозочного процесса : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. А. А. Ерофеева. – Гомель : БелГУТ, 2021. – С. 387–391.
11. Филатов, Е.А. Адаптация требований к стрелочным горловинам улучшенных эксплуатационных качеств для практического использования // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д. (Гомель, 24–25 ноября 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 74–76.