

УДК 654.6.4

*А. К. ГОЛОВНИЧ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТОЖДЕСТВЕННОГО ТРЕХМЕРНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБРАЗА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ**

Рассматриваются модельные схемы воспроизведения следствий влияния внешних факторов на железнодорожный путь и подвижной состав, которые непосредственно или косвенно воздействуют на технологические режимы работы железнодорожной станции, определяя задержки, ожидания, простои подвижного состава, вызывая нештатные ситуации и порождая опасные состояния объектов.

Реконструкция реалистичных модельных событий на информационной панели железнодорожной станции связывается с учётом влияния различных внешних факторов.

**1 Ветровая нагрузка.** Одним из значимых внешних влияний является воздействие на подвижной состав ветровой нагрузки. По возможным результатам действия следует рассматривать физические процессы влияния ветра на подвижной состав, находящийся на станционных путях (вагоны и локомотивы в ожидании выполнения технологических операций, а также под грузовыми операциями, технического и коммерческого осмотра в парках, под экипировкой, в ремонте, отстое и пр.) и в движении (при перестановке из парка в парк, на пункты местной работы, в депо).

Состав поезда, находящийся на приемоотправочном или сортировочном пути станции, может испытывать определенную нагрузку от ветра. В зависимости от его силы, направления действия и положения вагонов на пути возникает дополнительная сила, способная привести в движение незакрепленный подвижной состав. Из-за различной площади поверхности подвижного состава, встречающей сопротивление ветра (мидель), влияние ветровой нагрузки изменяется от минимального (при совпадении направления ветра и оси пути) до максимального (при их перпендикулярном взаимном расположении). Воздействие ветра на вагоны с большой площадью сопротивления (крытые, рефрижераторы, минераловозы) при недостаточном их закреплении и сильном ветре перпендикулярно оси пути может привести к опрокидыванию, а при действии ветра по оси пути – к самопроизвольному движению.

Действующими требованиями регламентируется закрепление локомотивов и вагонов на станционных путях. Если локомотив, прибывший с составом в парк, остаётся на этом пути, то он отцепляется от вагонов и закрепляется башмаками в заторможенном состоянии. Состав поезда или одиночные вагоны в зависимости от уклона пути фиксируются стояночным тормозом и (или) тормозными башмаками. Для модели важно следовать установленным требованиям безопасности. Если моделируются станционные технологические операции, то их проведение даже в таком своеобразном защищенно-информационном режиме невозможности получения тяжёлых последствий при возникновении критичных ситуаций («безопасная опасность») следует обеспечивать в строгом соответствии с требованиями согласно принципу полного соответствия модели прототипу.

Если на вагон действует ветровая нагрузка, то возникает сила, способная при преодолении трения покоя сдвинуть вагон с данного места нахождения на пути.

Дальнейшее его движение будет определяться соотношением величины внешнего усилия и сил трения. Модельная ветровая нагрузка инициирует фронтальное действие равной по величине внешней силы на все точки объекта, находящиеся в поле достижимости этой силы. Как правило, длительность постоянного действия ветровой нагрузки или кратковременный её импульс достаточны для того, чтобы получить ожидаемый негативный результат такого воздействия, т. е. возможного перемещения подвижного состава на станционном пути. Следует обратить внимание на различие моделируемых процессов влияния сил сопротивления при ветровой нагрузке на покоящиеся и движущиеся вагоны с соответствующей скоростью.

**2 Температурный фактор** оказывает существенное влияние на динамику взаимодействующих деталей и узлов подвижного состава и железнодорожного пути (рисунок 1).

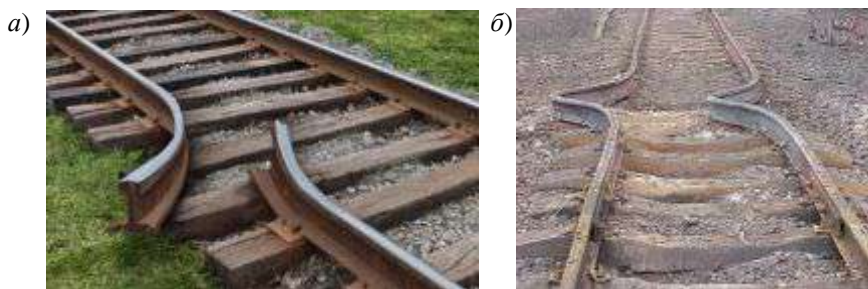


Рисунок 1 – Изменение состояние рельсовой колеи под воздействием температурного фактора;

а – разрыв рельса; б – смещение рельсоопальной решетки

Расширение металла при повышении температуры связывается с увеличением тепловой энергии свободных электронов, которые способны удаляться на большие расстояния от атомов, обеспечивая таким образом определенное «разбухание» всей решётки в целом. В соответствии с известным законом теплового расширения любое твердое тело с линейным размером  $L$  при увеличении температуры с  $T_1$  до  $T_2$  расширяется на величину  $\alpha L(T_1 - T_2)$ , где  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения.

Металлическая кристаллическая решётка претерпевает определенные изменения при колебаниях температуры наружного воздуха зимой и летом, которые могут привести к снижению надежности эксплуатации устройств пути и возникновению опасных состояний. Обратный процесс наблюдается при снижении температуры.

Для компенсации температурного расширения рельсов при их укладке устраиваются зазоры до 20 мм в стыках и увеличиваются размеры отверстий в рельсах и накладках по сравнению с диаметром стыковых болтов.

Известными фактами при низких температурах являются снижение прочности, пластичности, ударной вязкости (хладноломкость) и увеличение твердости стали. При наличии ползунов более 2 мм на колёсах вагонов в составах поездов при температурах ниже  $-25$  °С возникают опасные состояния пути вследствие ударного действия негладкой поверхности катания колеса на хрупкий рельс (рисунок 2).

При моделировании путевого развития станций данные физические процессы следует учитывать для адекватности с реальными условиями эксплуатации в различных температурных режимах. Поэтому предполагается формировать определённую микроструктуру цифровых объектов железнодорожного пути и отдельных деталей подвижного состава, составляющих между собой пары трения. Если к таким модельным объектам применить инструмент визуализации микроструктуры, то при определённой внешней нагрузке можно наблюдать изменения в кристаллической решётке соответствующего элемента железнодорожного пути или подвижного состава.

**3 Гравитационные воздействия.** Движение вагона под действием силы тяжести по железнодорожному пути с уклоном происходит при величине, превышающей значение, которое обеспечивает преодоление сопротивления среды, встречного ветра и суммарных сил трения в различных взаимодействиях узлов подвижного состава, а также трения покоя, скольжения и качения колеса и рельса.



Рисунок 2 – Разрушение рельса под действием ударной нагрузки от колеса при низкой температуре

Для начала движения вагона под уклон пути необходимо преодоление возникающих сил трения в буксах, зубчатых колёсах; автосцепке, поглощающих аппаратах; пятниках, подпятниках, шкворнях; рессорном подвешивании. Трение колеса и рельса происходит также в кривых и стрелочных переводах из-за скольжения реборд колес по боковой поверхности наружного рельса круговых, переходных кривых и в переводных кривых стрелочных переводов; ударного воздействия колес по стыкам рельсовых плетей. Кроме того, силы трения увеличиваются из-за наличия различных дефектов на поверхностях пар трения вагонов и железнодорожного пути.

Благодаря действию силы тяжести формируется угол естественного откоса груза, отсыпаемого на некоторую складскую поверхность или на пол вагона. При этом существенными условиями, определяющими угол естественного откоса, являются форма и размер частиц, их шероховатость, влажность, способ отсыпки, материал опорной поверхности, высота отсыпки. Эти условия влияют на результирующее значение силы трения, препятствующей распределению частиц груза параллельно опорной поверхности.

Модельная реконструкция процесса образования конусной формы отвала груза рассматривается как движение частиц груза из выходного устройства на приёмную поверхность склада или вагона и их последующие перемещения как по поверхности, так и со скатыванием по другим частицам под действием силы тяжести. Причём по мере увеличения массы насыпного груза в отвале возможно перемещение не только верхних, но и нижних слоёв частиц из-за увеличивающейся общей массы, способной «растекаться» далее по поверхности, нарушая установившееся ранее неустойчивое равновесие сил трения между частицами. Чем больше груза в отвале, тем более определённым будет фиксироваться угол естественного откоса, приближаясь к своему объективному значению, характеризующему связь между формой и размерами частиц груза, их влажностью, шероховатостью и другими параметрами, определяющими угол конусной направляющей откоса груза (рисунок 3).

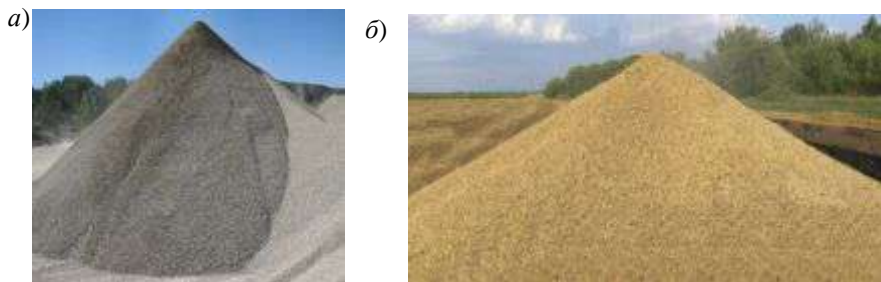


Рисунок 3 – Угол естественного откоса грузов:

*а* – щебня; *б* – зерна

Если насыпной груз отгружен в вагон (например, зерно в минераловозе), то после начала движения вагона при производстве маневровых операций или в составе поезда угол откоса изменяется, уменьшаясь в зависимости от размеров фракций груза и других характеристик до 30 % по отношению к углу естественного откоса в покое. Таким образом, угол откоса в покое может рассматриваться как форма неустойчивого равновесия между силой тяжести частиц груза и силами трения между этими частицами. Движение вагона добавляет частицам энергию в виде передающейся вибрации от ударных воздействий по стыкам путей, ускоренных и тормозящих влияний от локомотива, возникающих центробежных сил при движении в кривых. Прирост кинетической энергии позволяет частицам противодействовать удерживающим силам трения и распределяться по полу вагона с ещё меньшим углом откоса. Однако после снятия внешних нагрузок (например, остановки вагона) обратное движение частиц груза с достижением первоначального угла откоса покоя не происходит, так как действие силы тяжести фиксирует достигнутое положение частиц груза, закрепляя таким образом факт произошедших изменений с грузом. Определяющими достигнутое конечное расположение частиц груза характеристиками являются их размер и гладкость (шероховатость).

Сравнение углов естественного откоса таких различных по размерам и форме грузов, как каменный уголь и щебень, зерно и семя льна при прочих равных условиях показывает достаточно широкий диапазон отклонения величины исследуемого параметра (от 30–45° для первой пары грузов до 20–25° – для второй). При значительной высоте штабеля верхние слои будут продавливать нижние, формируя более пологий угол откоса по сравнению с верхними слоями.

Моделирование механических процессов взаимодействия частиц груза, обладающих одинаковыми или эквивалентными физическими характеристиками, позволит визуально получить конусную форму макрообъекта, занимающего относительно устойчивые контуры внешних границ расположения груза, способных измениться при сообщении данному взаимосвязанному конгломерату частиц дополнительной энергии. Таким образом, сложная система силовых воздействий гравитации на формируемый отвал груза приводит к «выдавливанию» отдельных частиц с занятием большей площади опорной горизонтальной поверхности при преодолении силы трения частиц о поверхность и скольжением частиц между собой с их перемещением наружу к направляющей грузового конуса.

Непрерывное истечение груза из погрузо-выгрузочного устройства (конвейера, бункера) позволит моделировать динамически развиваемую макроскопическую структуру отвала груза из уравновешенных взаимной силой трения и притяжением к горизонтальной опорной поверхности достаточно

мелких (насыпного груза) или относительно крупных (навалочного груза) частиц. Если скорость истечения груза достаточно велика, то трение покоя, единожды преодоленное постоянным движением частиц, не будет более возникать вследствие постоянного дальнейшего перемещения частиц груза. При этом угол откоса груза будет формироваться одинаковым по всем конусным границам.

При малых скоростях истечения груза или погрузке порциями (например, ковшем стрелового крана) каждый раз формируемый отвал будет проходить через стадию преодоления силы трения покоя, которая из-за своего более высокого, чем сила трения скольжения, значения будет приводить к появлению интервалов времени, в течение которых будут образовываться своеобразные выступы груза с большими углами естественного откоса, выравниваемые лишь после преодоления силы трения покоя увеличивающейся массой сверху.

В целом динамика движения частиц при различных условиях выгрузки грузов в отвал достаточно сложная, в которой часто значимыми будут определенные сочетания свойств смежных частиц, входящих во взаимодействие друг с другом. Процессы формирования углов откоса для одного и того же груза на площадке и в вагоне будут различны, а следовательно, будут приводить к различным результатам по достигаемым значениям углов откоса.

**4 Атмосферные летние осадки** оказывают существенное влияние на характер сцепления колеса и рельса, снижая их сцепление в процессе движения и торможения. Снижение трения скольжения приводит к более мягкому, «вязкому» перемещению колеса относительно рельса и как результат к более длительному торможению вагона, группы подачи или поезда для достижения низкой скорости или остановки состава.

Вторым факторным влиянием дождя является усиление коррозионных процессов на металлических поверхностях железнодорожного пути и подвижного состава при длительном воздействии. Модельная реконструкция физических процессов корродирующего влияния дождя позволит оценить потери силы тяги локомотива и потенциальной энергии при движении вагонов на подъем с необходимостью дополнительных тяговых усилий.

Особые последствия имеют ливневые осадки, которые кроме указанных выше воздействий могут привести к вымыванию нижнего строения пути и последующим просадкам верхнего строения. Моделирование гидродинамических процессов в слагающих основания станционных путей грунтах обеспечит оценку устойчивости и надежности пути при его эксплуатации. Кроме того, следует отметить, что воздействие ливневых осадков рассматривается как влияние стихийных обстоятельств в одном ряду с возникновением землетрясений, ураганов и пр. Для моделирования таких природных катастроф требуется разрабатывать среду *моделирующей контрреальности*.

Воздействие, оказываемое снегом, связывается с его влиянием на металлические элементы подвижного состава и пути, в том числе на многочисленные поверхности вагонов и локомотивов, соприкасаемые друг с другом в процессе движения. По сравнению с влиянием дождя снег оказывается более агрессивным. Фактор низкой температуры приводит к намерзанию снега на металлических поверхностях. Образующие уплотнения из снега и льда на рабочей поверхности рельсов способны вызвать проскальзывание колеса, препятствуя устойчивому сцеплению с рельсом. Низкая температура влияет на внутреннюю структуру металла, приводит к потере упругости и возникновению его хрупкости. Кроме того следует различать физические процессы воздействия снега при температуре наружного воздуха выше и ниже нуля градусов Цельсия, когда ожидается изменение свойств металлических поверхностей пути и подвижного состава в зависимости от различных температурных диапазонов.

Переохлаждение капель дождя, мороси, тумана вызывает появление и рост кристаллов инея, изморози или замёрзшей росы в зависимости от взаимного действия влажности воздуха, изменений температуры, рельефа местности, силы и направления ветра. Иней образуется в виде мельчайших кристаллов в холодные, ясные и безветренные ночи на непокрытых или слабо запорошенных снегом путях, шпалах и балласте. Небольшой ветер может способствовать быстрому увеличению кристаллов инея.

Изморозь представляет собой мелкие кристаллы льда, которые образуются в результате быстрого перехода из состояния водяного пара. При слабом ветре и температуре ниже  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  такие кристаллы за весьма короткое время нарастают на проводах контактной и осветительной сетей с наветренной стороны. Резкий рост размеров изморози наблюдается при повышении температуры, приближающиеся к  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Изморозь образуется также при тумане или густой дымке при большом количестве водяного пара в воздухе. Различают зернистую и кристаллическую изморози. Кристаллическая изморозь состоит из тонких кристаллов с плотной стекловидной структурой. Зернистая изморозь имеет вид рассыпающегося льда белого или полупрозрачного цвета, возникающего в туманную и ветреную погоду на пересечённом и горном профиле. Зернистая изморозь – это состояние воды, более плотное чем кристаллическая изморозь и мене плотное, чем гололёд.

Гололёд возникает, когда после морозов наступает резкое потепление, которое приводит к выпадению на поверхностях рельсов, земляном полотне переохлаждённых капель дождя. Замечен интересный факт, что на проводах под напряжением гололёдные отложения на 30 % больше чем на обесточенных, что связано с нагреванием проводов под действием тока. При гололёде усиление ветра до 10–12 м/с приводит к резкому нарастанию льда на прово-

дах. Известен случай, когда в одном из регионов нижней Волги толщина льда на проводах линий электропередач достигала 38 см.

Моделирование этих процессов очень важно для обеспечения нормальной работы железнодорожной станции зимой, так как образование льда на контактных проводах увеличивает нагрузку на опоры и изоляторы и в некоторых случаях приводит к обрыву проводов и обрушению опор.

Достаточно негативное влияние на путевую инфраструктуру станции оказывает туман, который иногда называют наземными облаками. Туман состоит из микроскопических капель воды и возникает при очень высокой влажности воздуха. Для крупных промышленных районов и железнодорожных станций туман может образоваться и при влажности воздуха не более 50 %, чему способствуют общая загазованность воздуха и пыль. Действие тумана зависит от высоты над уровнем океана. Чем выше, тем чаще возникают туманы, тем они гуще и длительные по времени существования.

Таким образом, штатное выполнение технологических операций на станции зависит от целого ряда факторов, обособленное или комплексное влияние которых в значительной степени определяет динамику процессов и достигаемое состояние объектов инфраструктуры и подвижного состава. Факторное влияние постоянно сопровождают выполняемые станционные операции, часто неотделимые от той или иной технологической операции. Например, в зимних условиях ходовые качества отцепов расформировываемых составов существенно хуже из-за негативного влияния снега, наледи и отрицательных температур. Продолжительность операций выгрузки сыпучих грузов также возрастает из-за необходимости размораживания грузов, длительной зачистки от их остатков после выгрузки.

В модели станции факторное воздействие достаточно дозированное по сравнению с реальными условиями. Цепочки наведенных корреляционных влияний нескольких факторов существенно укорачиваются. Например, в реальных условиях возможна следующая ситуация. Из-за действия мощного грозового фронта произошло обесточивание электрифицированного участка железной дороги, вызвавшего нарушение в графике движения поездов и несвоевременное поступление гружёных вагонов в адрес одного из цехов предприятия химической промышленности, работающего в непрерывном режиме. После прибытия этих вагонов работники транспортного цеха предприятия для ускорения операции выгрузки попытались использовать дополнительные выгрузочные средства, но стреловой кран из-за неправильной установки по причине спешки аварийно вышел из рабочего состояния. Стрела упавшего крана перекрыла соединительный путь, по которому внутриузловые передачи из соседней станции узла поступали в парк приёма для последующего расформирования на горке. Необслуженные за время устранения на предприятии последствия аварии передачи не позволили своевре-



менно сформировать другие передачи, подать на грузовые фронты вагоны, что обусловило появление многочисленных негативных постэффектов на достаточно обширном поле событий.

Однако в действительности подобная цепная волна нерегламентного отклика быстро затухает благодаря высокой «стрессоустойчивости», ригидности технической системы. Запас прочности в работе железнодорожных станций создаётся своеобразным технологически разрешённым покачиванием значений ответственных параметров транспортного процесса, и даже кажущееся значительное их превышение или занижение погашается соответствующим снижением или возрастанием связанных характеристик на другом этапе процесса. В результате многие негативные проявления взаимно погашаются, и модельные реконструкции технологического процесса обслуживания вагонопотоков на станции могут корректно реализовываться при учёте двух, реже – трёх и более гармоник коррелирующего воздействия.

Так как цифровой двойник станции должен отражать реальные технологические процессы, важным условием является выполнение всех модельных операций по законам физического взаимодействия тел. Поэтому модельные образы железнодорожного пути и подвижного состава должны быть максимально приближены к прототипам не только по внешней форме, но и по внутренней структуре, способной отражать изменение их состояний в результате возникающих внешних и внутренних воздействий. Все объекты второго плана в модельном исполнении представляют собой абсолютно твердые сплошные тела с жесткой и постоянной координатной привязкой, интегрируемые в базовую модель адекватности прототипу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 *Санакулов, А. Х.* Проблемы обледенения электрических и контактных сетей. [Электронный ресурс] / А. Х. Санакулов. – Режим доступа : <https://kpfu.ru/portal/docs/F83065962/Sanakulov.pdf>. – Дата доступа : 02.12.2023.

2 *Швер, Ц. А.* Атмосферные осадки на территории СССР / Ц. А. Швер. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 302 с.

3 *Транспортные системы и оборудование в деревообработке : метод. указания к лаб. работам / сост. С. П. Трофимов.* – Минск : БГТУ, 2023. – 46 с.

*А. К. GOLOVNICH*

#### **MODELING OF PHYSICAL CONDITIONS THE FUNCTIONING THE IDENTICAL 3D-INFORMATION IMAGE RAILWAY STATION**

The article considers model schemes for reproducing the consequences of the influence external factors on the railway track and rolling stock, which directly or indirectly affect the technological modes of operation a railway station, determining delays, waits, downtime of rolling stock, causing abnormal situations and generating dangerous conditions of objects.

Получено 10.11.2023