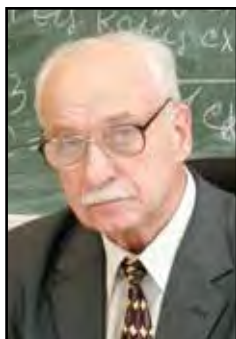




Физические механизмы подъёма балластных гранул при прохождении высокоскоростных поездов



Владимир БЕЛЬКОВ



Георгий ГОГРИЧАНИ

*Бельков Владимир Максимович – АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия.
Гогричани Георгий Венедиктович – АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия*.*

В статье проанализированы механизмы вылета щебня при высокоскоростном движении. Целью работы является исследование и выявление основного механизма вылета щебня из балластной постели. Обосновано, что им является выдавливание частиц из верхнего слоя гранул и их подъём над щебёночной постелью в результате действия продольных и поперечных напряжений в балласте, а наиболее вероятным местом их вылета является

граница контакта шпал и верхнего слоя щебёночной постели.

Представлена физика этого процесса, состоящая в подъёме балласта турбулентными вихрями, «взвешивании» частиц щебня над постелью под действием вибрации, в соударении движущихся частиц и процессе выдавливания и вылета гранул балласта.

Показаны причины возникновения горизонтальных и поперечных напряжений в щебёночном балласте.

***Ключевые слова:** железная дорога, высокоскоростные поезда, подъём гранул, вылет щебня, горизонтальные продольные и поперечные напряжения, балластная постель, наледообразование в подвагонном пространстве.*

*Информация об авторах:

Бельков Владимир Максимович – доктор физико-математических наук, научный консультант Научно-консультационного центра аспирантуры АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия.

Гогричани Георгий Венедиктович – доктор технических наук, заведующий Научно-консультационным центром аспирантуры АО «ВНИИЖТ», Москва, Россия, press@vniizht.ru.

Статья поступила в редакцию 23.01.2020, принята к публикации 02.07.2020.

For the English text of the article please see p. 63.

ВВЕДЕНИЕ

При классическом верхнем строении пути из щебня за счёт разнообразных воздействий, например, зимой, в результате падения крупных кусков льда, отдельные щебёночные камни могут выбрасываться вверх из балластной постели. Затем щебёночные частицы соударяются с находящимися под полом оборудованием транспортного средства и, как правило, с высокой скоростью отбрасываются вперед в направлении движения. После этого щебёночные камни могут вновь ударяться о балластную постель и вызвать выбросы других камней. Таким образом, может возникать вертикально поддерживаемая массивная «щебёночная лавина», которая приводит к сильному повреждению расположенных в подвагонном пространстве рельсового транспортного средства системных компонентов. Проблема вылета гранул щебня актуальна для всех высокоскоростных поездов там, где используется балластный путь.

В России при эксплуатации поездов «Сапсан» и «Ласточка» со скоростью движения 200 км/час и более в подвагонном пространстве и на внешней поверхности пути вблизи рельсов наблюдается подъём крупных и мелких гранул и пылеватых частиц балласта, которые «бомбардируют» подвагонное оборудование и электрокабели, приводят к порче амортизаторов и силовых кабелей. Пылеватые частицы повреждают стёкла окон, делают их поверхность менее прозрачной и пористой.

Эксплуатация высокоскоростных поездов (ВСП) зимой сопровождается образованием снежно-ледяных отложений в подвагонной части поезда. Осыпавшиеся глыбы льда, соударяясь с рельсами и щебнем, частично разрушаются и разлетаются, повреждая объекты инфраструктуры, вызывают выбросы щебёночных гранул и значительные повреждения подвагонного оборудования.

Целью настоящей работы является исследование, и выявление основного механизма вылета щебня из балластной постели с использованием аналитических методов.

1. БАЛЛАСТ ПУТИ И ДЕГРАДАЦИЯ ЕГО ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

В России в соответствии с ГОСТ 7392-2002 для балластного слоя путей 1–3 классов применяется только щебень твёрдых пород

марки И20 с пределом прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии не менее 20 МПа. Щебёночный балласт, приготовленный из прочных магматических пород (граниты, габбро, диориты, сиениты (глубинные породы), диабазы, базальты (излившиеся породы)), является лучшим из современных балластных материалов, благодаря долговечности, высокой сопротивляемости осадкам шпал и их смещениям в горизонтальной плоскости, хорошим дренирующим, упругим и электроизоляционным свойствам щебёночной призмы.

По мере накопления засорителей балласта ухудшаются его дренирующие свойства [1]. В щебёночной балластной призме наиболее сильно засоряется щебень в верхней части шпальных ящиков, у боковых граней и торцов шпал, а также под подошвой, начиная от краёв шпал и далее к её середине. Для щебня наибольший допустимый процент засорения (содержание частиц мельче 25 мм) по массе составляет 30 %, из них мельче 0,1 мм – не более 5 %. В очищенном щебне содержание частиц размерами менее 20 мм не должно превышать 5 % от массы пробы.

В период производства ремонтных работ или при укладке пути и уплотнению балласта может быть достигнута предельная плотность щебня 0,33–0,34. Обычно она находится в пределах 0,36–0,40. По мере загрязнения щебня и роста пропущенного по пути тоннажа наступает период нарастания неравномерно распределённых по длине пути деформаций, возникающих из-за выпирания балласта из-под шпал, накапливания мелких фракций загрязнений в нижней и верхней частях слоя балласта, а также из-за выплесков. Уровень динамического воздействия на путь и земляное полотно от ВСП растёт прямо пропорционально квадрату их скорости и с учётом высокочастотной вибрации вызывает резкий рост остаточных деформаций, в том числе интенсивное дробление балластного слоя в пути и интенсивный износ подвижного состава.

Выполненные исследования прочностных свойств балластного материала [2] показали, что засорение щебня песками и пылеватыми частицами приводит к снижению прочностных характеристик как при действии статических, так и вибрационных нагрузок. Величина удельного сцепления снижается при статической нагрузке





Рис. 1. Повреждения корпуса вагона от ударов частиц щебня [6].

на 25 %, при вибрационной – на 29 %. Снижение угла внутреннего трения в рассматриваемом диапазоне засорения щебня песками при действии статической и вибрационной нагрузки составляет 12 и 19 % соответственно. Вибрации, как широко известно, используются в технологии уплотнения и транспортирования сыпучих материалов, благодаря значительному снижению структурной вязкости дисперсных материалов. По заключению, сделанному в работах [3–5], вибрации вызывают расстройство нижнего строения пути и более интенсивное накопление в нём остаточных деформаций, а кроме того, снижают прочностные характеристики щебня.

Таким образом, вибрация способствует сепарации гранул щебня по размерам, заполнению порового пространства слоя щебня пылевидными частицами от перевозимых грузов, мелкой фракцией менее 1 мм при истирании балласта, рельсов и колёс, тормозных колодок и аэрозоля, при использовании песка для улучшения сцепления колёс и рельсов; приводит к удержанию осадков и талой влаги. Биологическое засорение балластного и песочного слоя корневыми системами травяной растительности, которые быстро прорастают вглубь, устремляясь вниз к воде (явление геотропизма), обуславливают появление набухания корней и расклинивающего давления 10–15 МПа [1]. Гранулы щебня, благодаря расклинивающему давлению растущих корней, раздвигаются, увеличивается порозность до 60–70 %, снижается прочность сцепления щебёночных гранул. При отмирании корней весной их место занимают гумус и вода. Из-за загрязнения нефтепродуктами из-за проливов на железнодорожное полотно и остатками смазки от лубрикации колёс и рельсов сгнившие остатки растений начинают обладать смазывающим действием и могут понизить структурную вязкость сыпучих материалов в 10 ... 30 раз [1].

2. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА БАЛЛАСТ

Спектр аэродинамических проблем, возникающих при движении ВСП со скоростями более 250 км/час, чрезвычайно разнообразен. Частицы или гранулы балласта, как считается, под действием турбулентных вихрей вылетают из балластной постели и приводят к повреждению подвижного состава, путевой инфраструктуры и придорожных сооружений в полосе отвода железной дороги [6]. Это явление является серьёзной угрозой для безопасности эксплуатации поезда и пассажиров (рис. 1 [6]).

По данным американских исследователей [7], скорость ВСП 260 км/ч может быть пороговым значением для подъёма и полёта гранул балласта, а при снежных заносах и сильном дожде подъём гранул балласта может начаться при более низких скоростях движения, что связано с понижением структурной вязкости щебня. В России подъём щебёночных гранул, по данным технического отдела Октябрьской железной дороги, наблюдается, начиная со скорости 210 км/час.

Проблема вылета гранул щебня из балластной постели обычно решается методом расчёта рисков [7], теоретически с экспериментальной проверкой и компьютерным моделированием [8; 9]. С помощью экспертных оценок рассчитывается последовательный риск наступления события вылета щебня и бомбардировки им кузова или инфраструктурного объекта с расчётом последующих финансовых потерь. Характер структуры потока воздуха вокруг поезда часто вообще не учитывается. В докладе [7] приводятся пять факторов возникновения подъёма щебня: эксплуатационная скорость, конструкция поезда и соответственно обтекание и турбулирование воздушного потока, величина динамической нагрузки, качество обслуживания пути и сильный боковой ветер. Подъём гранул балласта [7] также может наблюдаться и при меньшей скорости дви-

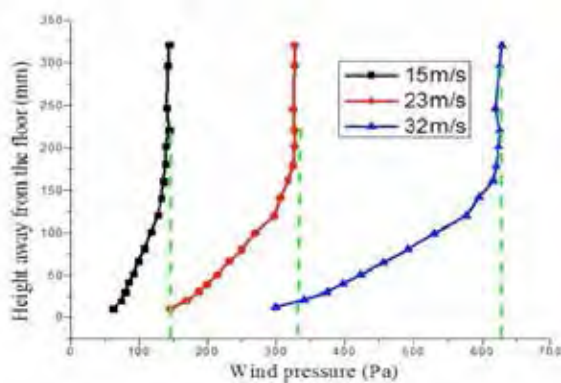


Рис. 2. Зависимость подъёма частиц от их размера и скорости потока и давления в нём [9].

жения поезда в тоннелях. Накопление снега вдоль пути, прохождение ВСП во встречном направлении также способствует подъёму гранул балласта. Было отмечено, что в тоннелях, где вывешены знаки ограничения в скорости «не более 140 км/час», высокоскоростные поезда также имели значительный ущерб от ударов гранул балласта.

В работе [8] проведено оптическое детектирование вылета щебня в аэродинамической трубе. По результатам лабораторных исследований разработана аэродинамическая модель для расчёта вылета гранул щебня, а также проведены динамические расчёты инерционной массы щебня, определены количество «подвижного» щебня на щебёночной постели для отдельных гранул щебня и вероятность попадания щебня в поезд и его повреждения. Кроме того, были рассчитаны аэродинамические силы, скорость начала возникновения турбулентных потоков от тележек и других конструкций вагона.

В работе [9] при моделировании учтены аэродинамические характеристики гранул щебня: их распределение по размерам, по площади поверхности, массе и форме. С помощью программного обеспечения CFD проведено моделирование поведения отдельных балластных частиц в воздушном потоке аэродинамической трубы и экспериментально найдены зависимости подъёма частиц от их размера и скорости потока и давления в нём, кривизны площадки, где были размещены гранулы щебня (рис. 2). В работе также приведена минимальная скорость ветра, при которой начинаются небольшие перемещения отдельных гранул щебня, – 8 м/с. При скорости ветра 25 м/с большинство гранул начинает дискретно перемещаться.

В режиме эксплуатации в летний период, как считают авторы работ [9; 10], скорости ВСП $V > 340$ км/час разумны только при условии безбалластного пути. Для скоростей поезда $V > 280$ км/ч требуется особая форма и большие размеры щебёночных гранул на поверхности постели. Эксплуатация ВСП в зимний период, когда путь покрывается льдом и снегом, при скорости движения $V_{\max} > 250$ км/ч должна проходить только на безбалластном пути. Компания SNCF рекомендует скорость движения ВСП в диапазоне критических температур и начала снегопада не выше 200 км/час. Для Франции такие условия наблюдаются в течение порядка 20 дней в году (для России – 90 дней).

В сообщении [10] впервые описан эффект изъязвления передней тележки ВСП из-за «бомбардировки» частицами щебня и продуктами его измельчения. В рамках этого исследования были измерены с помощью тензодатчиков вибрации в балласте, создаваемые ВСП. Как показал анализ, напряжения в щебёночной постели не связаны с аэродинамическими факторами. Поэтому авторы предположили, что механические вибрации земляного полотна способствуют «подвешиванию» частиц, и в сочетании с вертикальными турбулентными потоками воздуха возникает «облако» с наибольшей концентрацией частиц перед первым вагоном и с пониженной концентрацией у хвостового. Эти частицы, соударяясь с корпусом ВСП, дробятся и разлетаются по обе стороны поезда. Для обоснования предложенного вибрационного механизма вылета щебня, авторы ссылаются на инспекционные осмотры повреждений ВСП и свидетельства ремонтников. Для более детальной проверки



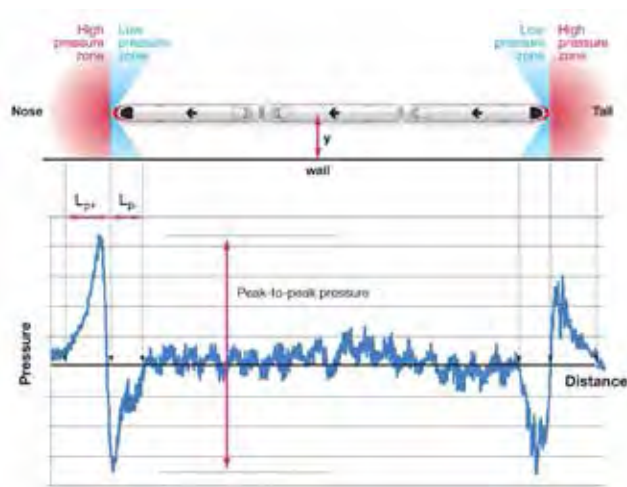


Рис. 3. Зоны высокого и низкого давления, возникающие при движении ВСП [10].

этой теории, по мнению авторов, требуются дополнительные исследования. На рис. 3, взятом из отчёта [10], схематично показана структура турбулентного потока, возникающая в носовой и хвостовой зонах ВСП. Интенсивность цвета в зонах соответствует большему давлению. Передняя область или фронт высокого давления, так называемый Slipstream, или скользящий поток, в виде «языка» может поднимать частицы щебня. Давления в указанных областях пульсируют во времени и для различных ВСП могут заметно отличаться.

В работе [11] экспериментально исследованы скорости и давления в аэродинамическом поле подвагонного пространства с помощью трубок Пито и тензодатчиков. Вблизи балластной постели средняя скорость составляет всего 1/3 от скорости поезда, в то же время стандартное отклонение колебаний скорости потока воздуха составляет порядка 1/10 скорости поезда. Средняя скорость потока воздуха изменяется под влиянием деталей в подвагонном пространстве и их формы, включая оси тележек, переходы между вагонами и вспомогательное оборудование. Вертикальный профиль флуктуаций скорости приблизительно равномерный. У щебёночной постели скорость потока составляет 0,06 скорости поезда. Высокая скорость видеозаписи движения балластных частиц помогла прояснить некоторые механизмы, определяющие их перемещения. Процесс перемещения гранул щебня включает в себя стадию начала движения или трогания с места отдельных небольших

гранул. Затем начинается продольная миграция по «шероховатой» поверхности балластной постели небольших гранул и соударения с соседними частицами, имеющими большие размеры.

Движущей силой процесса, по нашему мнению, могли бы быть знакопеременные аэродинамические силы турбулентных вихрей, стабилизированных пылеватыми минеральными частицами, снегом (в зимний период) и засорителями балласта и частичками льда размерами 1 ... 10 мм.

Авторы [11] считают, что контактные взаимодействия движущихся гранул с щебёночными частицами больших размеров играют центральную роль. Когда малые частицы достигают достаточного продольного импульса, контактные взаимодействия могут привести к тому, что большая гранула набирает достаточный горизонтальный импульс, чтобы при соударении с соседней произошёл подъём частицы в воздух.

Сформированный скользящий поток высокого давления перед ВСП (рис. 3 [10]) подхватывает вылетевшие гранулы и поднимает их на большую высоту. Вертикальные вибрации земляного полотна способствуют снижению структурной вязкости в верхнем слое щебня, облегчая процесс подъёма больших гранул щебня. Процитированные в данном разделе результаты научно-исследовательских работ и выводы, сделанные в этих работах, особенно на основании модельных экспериментов с малым числом гранул и без учёта вибрационного воздействия, а также численные эксперименты на

основе лабораторных экспериментов могут неадекватно описывать процесс вылета гранул щебня.

3. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫЛЕТА ШЕБЁНОЧНЫХ ГРАНУЛ ИЗ БАЛЛАСТНОЙ ПОСТЕЛИ

На основании рассмотрения научных публикаций [6–11] можно систематизировать описанные в них возможные механизмы вылета балластных частиц:

1. Подъём балластных гранул турбулентными вихрями [6–9], которые, по мнению авторов [6; 7], возникают при высокой скорости движения поезда. Вылету щебня способствуют конструкционные недостатки вагонов, ухудшающие обтекание и приводящие к возрастанию турбулизации потока воздуха. Плохое состояние верхнего слоя щебёночной призмы и малые размеры гранул на её поверхности; сильный боковой ветер; движение поезда в тоннелях, в которых турбулизация потока воздуха наступает при значительно меньших скоростях; прохождение встречного ВСП и накопления снега вдоль путей – вот причины, по мнению авторов, которые увеличивают подъём балластных гранул.

2. «Подвешивание» частиц щебня над постелью под действием механических вибраций земляного полотна [10], которые способствуют в сочетании с вертикальными турбулентными потоками воздуха и фронтом высокого давления впереди ВСП подъёму частиц щебня.

3. Контактные соударения движущихся малых частиц с гранулами больших размеров и накопление достаточного горизонтального импульса таким образом, чтобы при соударении с соседней частицей произошёл подъём большой гранулы в воздух [11].

Для реализации первого механизма – подъёма балластных гранул турбулентными вихрями требуется высокая скорость движения ВСП, около 300 км/час. Неудовлетворительная аэродинамика подвагонной части ВСП приведёт к снижению скорости вблизи балластной постели ниже 1/3 скорости поезда [11]. Загрязнение верхнего слоя призмы только улучшит обтекание из-за уменьшения «шероховатости» балластной постели и снизит концентрацию турбулентных трубок. Сильный боковой ветер только смещает фронт высокого давления и граничный поток вокруг ВСП.

Турбулентные вихри в воздухе, по нашим исследованиям [12], представляют собой «трубки» диаметром 30 ... 40 мм с невысоким разряжением внутри. Для набора мощности «торнадо» турбулентные вихри должны набрать значительную массу минеральной пыли, но при скорости движения ВСП этот процесс не успеет осуществиться. Следовательно, первый механизм вылета гранул щебня маловероятен.

Оценим возможность реализации второго механизма – «подвешивания» частиц щебня над постелью под действием вертикальных механических вибраций земляного полотна. Вертикальная составляющая колебаний балластного слоя из гранитного щебня имеет сложный характер с резкими всплесками записи и значительными различиями в колебательном процессе при проходе вагонов [13].

Первая гармоника – низкочастотная, лежит в диапазоне от 1,13 (55 км/ч) до 1,48 Гц (125 км/ч) и имеет амплитуду 130 ... 450 мкм соответственно в сечении у подошвы торца шпал. При скорости движения ВСП 250 км/ч первая гармоника составит ~3 Гц, а амплитуда ~1 ... 1,2 мм. Период колебаний низкочастотной гармоники практически соответствует времени, необходимому для прохода экипажем расстояния между крайними осями тележки.

Вторая гармоника – среднечастотная, с частотой 3 ... 13,5 Гц и амплитудой 30 ... 220 мкм, зависит от скорости поезда и возникает при прямом силовом воздействии отдельных осей вагонов на рельсы и балласт. При скорости движения ВСП 250 км/ч вторая гармоника составит ~27 Гц, а амплитуда ~0,4 мм.

Третья высокочастотная гармоника амплитудой от 0 до 21 мкм при скорости движения вагонов от 55 до 125 км/ч находится в частотном диапазоне от 125 до 250 Гц. Высокочастотная вертикальная составляющая для скорости составит примерно 500 Гц и из-за инерционности щебёночной призмы практически полностью поглощается.

Максимальная скорость, получаемая частицей при гармонических колебаниях балласта, равна $v_{\max} = A\omega$, где A – амплитуда и ω – круговая частота компоненты вибрации. Для гранулы размером 60 мм кинетическая энергия будет равна $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ Дж. При упругом соударении частиц верхнего и ниж-





него слоёв без учёта трения частицы о соседние гранулы потенциальная энергия верхней частицы увеличится, и максимальная высота подъёма составит $\sim 0,5$ мкм. С учётом соударения с тремя соседними частицами в нижнем слое высота подъёма не превысит ~ 1 мкм.

Для среднечастотных колебаний и той же гранулы высота подъёма будет $\sim 0,23$ мм, а при соударении с тремя нижележащими соседними частицами составит $\sim 0,5$ мм. Такого подъёма гранулы от щебёночной постели, вблизи которой скорость потока, как показано в работе [11], близка к 15 км/ч, недостаточно. Кроме того, турбулентные вихри у стены движутся в противоположном направлении. Поэтому захват лёгких гранул фронтом высокого давления также маловероятен.

Третий механизм — контактные взаимодействия движущихся малых частиц с гранулами больших размеров для подъёма над щебёночной постелью также маловероятен, так как гранулы плотно упакованы даже в верхнем слое и не могут независимо двигаться под действием воздушного потока, и, принимая во внимание его низкую скорость на границе раздела «воздушный поток—щебёночная постель», получаемые частицами импульсы из-за соударений с соседями будут рассеиваться в поверхностном слое в объём щебня.

4. НОВЫЙ МЕХАНИЗМ — ВЫДАВЛИВАНИЕ ГРАНУЛ ИЗ БАЛЛАСТНОЙ ПОСТЕЛИ

Наиболее вероятным механизмом вылета щебня, по нашему мнению, является выдавливание и выброс гранул из верхнего слоя щебёночной постели при возникновении продольных и поперечных горизонтальных и отражённых от внутренних слоёв щебёночной призмы вертикальных напряжений в щебёночном балласте. Горизонтальные продольные и поперечные напряжения в щебёночном балласте между шпалами возникают при уgone рельсов в результате торможения ВСП при больших скоростях движения и температурных градиентах вдоль пути и концентрируются вблизи боковых поверхностей шпал. Кручение шпал при наезде на них колёс также способствует выдавливанию щебёночных гранул. Продольные силы возникают также при проскальзывании колёс

по рельсам в кривых и рекуперативном торможении поездов.

Для моторного вагона, имеющего две тормозные оси, коэффициента трения колёс о рельсы 0,24, нагрузки от колёсной пары на рельсы 80 кН, доли сцепного веса, используемого для торможения, равной 0,5, сила угона от торможения будет равна $F_y = 2/2 \cdot 0,24 \cdot 0,5 \cdot 80 = 9,6$ кН. Примем коэффициент передачи силы угона на шпалу, равным 40 % [14; 15], тогда сила, действующая со стороны шпалы на верхний слой балласта, будет равна 3,8 кН. Наибольшие напряжения отмечаются вблизи шпал под рельсами, поэтому для геометрической площади боковой поверхности шпалы, равной $S_6 = 0,154 \cdot 2,7 = 0,416$ м², истинная площадь контакта гранул поверхностного слоя гранул будет в два раза меньше, то есть 0,208 м². Доля площади подошвы шпалы β_r с гранулами под нагрузкой 80 кН, контактирующей со щебёночными гранулами, составляет $\beta_r = 8$ % [16]. Так как фактическая площадь упругого контакта прямо пропорциональна нормальной нагрузке [17], то доля площади боковой поверхности шпалы под нагрузкой силы угона 3,8 кН с поверхностными гранулами балласта будет в двадцать раз меньше (0,4 %). С боковой поверхностью шпалы контактирует приблизительно $n \approx 50$ гранул, поэтому на границу контакта каждой гранулы со шпалой будет действовать напряжение, вектор которого направлен нормально к боковой поверхности шпалы:

$$\tau_r = (0,4 \cdot F_y) / (\beta_r \cdot S_6 \cdot n) = (0,4 \cdot 9,6 \cdot 10^3) / (0,004 \cdot 0,208 \cdot 50) \approx 91,3 \text{ кПа.} \quad (1)$$

Угол наклона боковой поверхности шпалы к горизонту равен $\alpha \approx 72^\circ$. Горизонтальные реакции касающейся шпалы гранулы будут скомпенсированы двумя соседними, находящимися в одной плоскости с основной гранулой (наихудший случай). Если соседние гранулы располагаются несколько ниже основной гранулы, например, на 30° ниже, то появится дополнительное вертикальное напряжение:

$$\tau_{\text{верт.}} \approx 2\tau_r \cdot \cos 30^\circ \cdot \cos 30^\circ \cdot \sin 30^\circ = 0,76\tau_r. \quad (2)$$

Вертикальный импульс силы угона, действующий на ближайшую к шпале округлую, размером 60 мм и весом 0,07 кг гранулу, будет равен:

$$\tau_r \cdot S_k \cdot \Delta t \cdot [\cos \alpha + 0,76 + 2\cos 30^\circ \cdot \cos 30^\circ \cdot \sin 30^\circ] = 1,81\tau_r \cdot S_k \cdot \Delta t = m_r \cdot V_r, \quad (3)$$

где S_k – площадь контакта одной гранулы со шпалой, равна $\beta_r \cdot S_0/n = 1,7 \cdot 10^{-4}$;

$\alpha = 72^\circ$ – угол наклона контактной площадки к поверхности щебёночной постели; время действия импульса равно $\Delta t = l/V_n$; l – половина расстояния между шпалами (~ 273 мм);

V_n – скорость поезда (250 км/ч).

Коэффициент трения сухого бетона по сухому бетону составляет 0,7, а для частично загрязнённого нефтепродуктами и покрытого обводнёнными пылеватыми частицами коэффициент трения в два–три раза ниже (0,35). Сила трения, действующая вдоль боковой поверхности шпалы и с соседними гранулами, равна:

$$F_{тр} = k_{тр} \cdot \tau_r \cdot S_k \cdot (\cos 72^\circ + 2 \cos 30^\circ) = 2,1 k_{тр} \cdot \tau_r \cdot S_k. \quad (4)$$

Добавим в левую часть уравнения (3) вертикальную отрицательную проекцию импульса силы трения $F_{тр} \Delta t$, и, решив уравнение относительно начальной скорости вылетевшей из постели частицы щебня, в окончательном виде получим:

$$V_r = \frac{(1,81 - 0,73)l \cdot S_k \tau_r}{m_r \cdot V_n} = \frac{1,08 \cdot 1,73 \cdot 10^{-4} \cdot 0,273 \cdot 91,3 \cdot 10^3}{0,07 \cdot 69,4} \approx 0,94 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Для гранулы размером 25 мм скорость вылета равна 2,2 м/с. При выдавливании гранул щебня из балластной постели мы не учли импульс силы, направленный вниз, при наезде колеса на шпалу и обратную упругую реакцию земляного полотна. В разделе 3 настоящей статьи при оценке возможности реализации второго механизма «подвешивание» частиц щебня в сечении у подошвы торца шпал осуществляется энергией второй гармоники с частотой ~ 27 Гц и амплитудой $\sim 0,23$ мм. Средняя вертикальная гармоническая сила, прилагаемая к грануле вблизи шпал в течение полупериода для первой гармоники, будет равна:

$$\bar{F}_{\text{гарм1}} = \frac{m_r \cdot A \omega^2}{\pi} \int_0^\pi \sin \omega t \, dt = \frac{2A m_r \omega}{\pi} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ Н}. \quad (6)$$

Для второй гармоники $F_{\text{гарм2}} = 1,24$ кН. Импульс силы для полуволны второй гармоники равен $5,5 \cdot 10^{-2}$ Н·с, а дополнительная скорость гранулы размером 60 мм составит 0,8 м/с, для гранулы размером 25 мм – 0,34 м/с.

Угол поворота шпалы не входит в нормируемые параметры железнодорожной колеи,

рассчитаем его относительно скрепления для равномерного прогиба рельса на 3 мм в средней его части между шпалами. Для соотношения рельсового плеча (546:2 мм) и высоты шпалы (183 мм) угол α равен $6,4^\circ$. Но, поскольку мы не учли нелинейный прогиб рельса, примем угол поворота $\alpha \approx 6^\circ$. С учётом вращения шпалы на 6° уравнение (3) примет вид:

$$\tau_r \cdot S_k \cdot \Delta t \cdot \cos(\alpha - 6^\circ) = m_r \cdot V_r, \quad (7)$$

и скорость, найденная из уравнения (4), увеличится в 1,1 и составит 1,03 м/с плюс 0,8 м/с.

Из равенства кинетической и потенциальной энергии щебёночной частицы размером 60 мм находим высоту подъёма самой крупной гранулы щебня $\sim 0,17$ м.

Скорость распространения волны напряжений сжатия в стали при уgone рельсов составляет ~ 10 км/с, поэтому воздушный фронт высокого давления способен поднять вылетающие гранулы на большую высоту, опасную для ВСП и инфраструктуры. Гораздо большие значения имеют продольные силы в рельсах от изменения температуры и при экстренном торможении. Например, для новых рельсов типов R65 сила угона, действующая на шпалу при повышении температуры на 1°C , равна соответственно 20,7 кН, и подъём частиц увеличится в 2,2 раза.

По мере истирания щебёночного слоя округлых частиц будет всё больше, порозность поверхностного слоя выше, и, следовательно, меньше трение, и чаще будет происходить вылет гранул щебня. Наиболее вероятными местами вылета гранул щебня являются перегоны вблизи населённых пунктов, где происходят изменения режимов движения (набор скорости движения и торможение), а также обледенение поверхности частиц щебня. Поднявшиеся лёгкие гранулы, соударяясь с подвагонным оборудованием и отлетая с высокой скоростью, могут вызывать лавинный процесс подъёма щебёночных частиц.

ВЫВОДЫ

1. На основании оценочных расчётов показано, что основным механизмом вылета щебня при высокоскоростном движении является выдавливание частиц из верхнего слоя гранул и их подъём над щебёночной постелью в результате действия продольных и поперечных напряжений в балласте. Наи-



более вероятным местом вылета щебёночных частиц является граница контакта шпал и верхних слоёв щебёночной постели.

2. Физические механизмы — подъём балласта турбулентными вихрями, «подвешивание» частиц щебня над постелью под действием механических вибраций земляного полотна, контактные соударения движущихся малых частиц с гранулами больших размеров — способствуют увеличению пористости щебёночного слоя, снижению структурной вязкости, изменению ориентации частиц и, следовательно, облегчают выдавливание и вылет гранул балласта.

3. Образующиеся в подвагонном пространстве ВСП при определённых погодных условиях глыбы льда осыпаются, соударяясь с рельсами и щебнем и разрушаясь, и также являются механизмом вылета щебёночных частиц.

4. В работе сформулирован новый механизм подъёма гранул над щебёночной постелью в результате действия продольных и поперечных напряжений в поверхностном слое балласта. Для исключения вылета щебёночных гранул и предотвращения ущерба ВСП и инфраструктуре могут быть разработаны комплексные способы резкого снижения продольных и поперечных напряжений в поверхностном слое балласта и наледообразования в подвагонном пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бельков В. М., Антипов Б. В. Физико-химические основы устойчивости пути // Путь и путевое хозяйство. — 2013. — Вып. 12. — С. 21–24.
2. Колос А. Ф., Турсунов Х. И., Николайтис Д. С. Исследование прочностных свойств балластного материала, засорённого барханными песками // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2012. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-prochnostnyh-svoystv-ballastnogo-materiala-zasorennymi-barhannymi-peskami/pdf>. Доступ 14.05.2020.
3. Каменский В. Б. Совершенствование системы ведения путевого хозяйства в современных условиях работы железных дорог // Автореф. канд. тех. наук. — М., 2011. — 23 с.
4. Пейч Ю. Л. Взаимодействие элементов пути в условиях засорения и увлажнения // Автореф. док. тех. наук. — М., 2011. — 23 с.
5. Огибалов П. М., Мирзаджанзаде А. Х. Нестационарные движения вязкопластичных сред. — М.: Из-во МГУ, 1977. — 372 с.
6. Derkowski, P., Clark, S., Sturt, R., Keylin, A., Baker, C., Vardy, A., Wilson, N. High-Speed Rail Aerodynamic Assessment and Mitigation Report. U.S. Department of Transportation. Federal Railroad Administration, Office of Research, Development, and Technology, Washington, DC20590. Report Number: DOT/FRA/ORD-15/40. December 2015, 258 p. [Электронный ресурс]: <https://railroads.dot.gov/>

elibrary/high-speed-rail-aerodynamic-assessment-and-mitigation-report. Доступ 14.05.2020.

7. Saat, M. R., Bedini-Jacobini, F., Tutumluer, E., Barkan, C. P. L. Identification of High-Speed Rail Ballast Flight Risk Factors and Risk Mitigation Strategies, Final Report. Federal Railroad Administration, Washington, DC, Report Number: DOT/FRA/ORD-15/03. 2015, 76 p. [Электронный ресурс]: https://railtec.illinois.edu/wp/wp-content/uploads/pdf-archive/TR_Identification-of-Ballast-Flight-Risk_final.pdf. Доступ 14.05.2020.

8. Baker, C. J. A review of train aerodynamics. Part 1 — Fundamentals; Part 2 — Applications. The Aeronautical Journal, 2014, Vol. 118, Iss. 1201, 1202. [Электронный ресурс]: <https://core.ac.uk/download/pdf/185479708.pdf>; <https://core.ac.uk/download/pdf/185479709.pdf>. Доступ 14.05.2020.

9. Jing, G., Liu, G. X., Lin, J., Martinez, J., Yin, C. T. Aerodynamic Characteristics of Individual Ballast Particle by Wind Tunnel Tests. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2014, Vol. 7, Iss. 2, pp. 137–142. [Электронный ресурс]: <http://www.jestr.org/downloads/Volume7Issue2/fulltext217214.pdf>. Доступ 14.05.2020. DOI: 10.25103/jestr.072.21.

10. Quinn, A. D., Hayward, M. Full-scale aerodynamic measurements underneath a high speed train. BBAA 6th International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications. Milano, Italy, July, 20–24, 2008. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/237112260_full-scale_aerodynamic_measurements_underneath_a_high_speed_train/link/554898b80cf2b0cf7aced5ff/download. Доступ 14.05.2020.

11. Lazaro, B. J., Gonzalez, E., Rodriguez, Manuel; Rodriguez, Miguel, Osma, S., Iglesias, J. Characterization and Modeling of Flying Ballast Phenomena in High-speed Train Lines. 9th World Congress Railway Research, May 22–24, 2011. [Электронный ресурс]: Challenge E: Bringing the territories closer together at higher speeds. http://www.railway-research.org/IMG/pdf/e4_lazaro_benigno.pdf. Доступ 14.05.2020.

12. Бельков В. М., Журавлева М. А. Моделирование загрязнения железнодорожного полотна и технической полосы пылеватыми частицами // Вестник ВНИИЖТ. — 2015. — № 2. — С. 9–14. [Электронный ресурс]: <https://www.journal-vniizht.ru/jour/article/viewFile/22/23>. Доступ 14.05.2020.

13. Турсунов Х. И. Исследование колебательного процесса в балластной призме железнодорожного пути, засорённой барханными песками // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». — 2012. — № 3. [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-koлебательnogo-protsessa-v-ballastnoy-prizme-zheleznodorozhnogo-puti-zasorennoy-barhannymi-peskami/pdf>. Доступ 14.05.2020.

14. ГОСТ Р 55050-2012 Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний (с Изменением № 1). [Электронный ресурс]: <http://docs.cntd.ru/document/1200096113>. Доступ 14.05.2020.

15. Эффективные подпольные и напольные прокладки из материалов SYLOMER и SYLODYN. ООО «Акустические материалы и технологии», Киев. [Электронный ресурс]: <http://www.acoustic.ua/articles/113>. Доступ 14.05.2020.

16. Экспериментальная оценка взаимодействия экипажа и пути при скоростном и высокоскоростном движении: Монография / Под ред. А. М. Бржезовского. — М.: ПАС, 2019. — 152 с.

17. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. — М.: Физматлит, 2012. — 348 с.