

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-234-242>

УДК 625.122+625.142.4

## Рельсовый путь с обжатием рельса

Канд. техн. наук, доц. В. Н. Суходоев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021  
Belarusian National Technical University, 2021

**Реферат.** Проблема гашения шума на рельсовых путях, возникающего при движении поезда, решается достаточно просто, если рельс с прокладками уложить внутри продольно расположенной ленточной шпалы-механизма. Результат – слоистая рельсовая нить, состоящая из лент: лента рельса с упругими прокладками по трем сторонам, лента шпалы-механизма и балластного слоя. Единение слоев осуществляется благодаря собственной массе. Это – статика пути без внешней нагрузки. Обжатие рельса – эффективное свойство рельсовых путей – образуется в шпале-механизме под воздействием вертикальных сил с подвижками и их горизонтальных производных. При нагружении пути обжатие осуществляется многократно с последующей разгрузкой. При этом каждые предшествующие изменения условий в работе пути учитываются в дальнейшем цикле нагружения и разгрузки. Рельсовый путь с обжатием рельса – разновидность самоприспосабливающейся линейной системы, необходимая при частых изменениях нагрузки и условий эксплуатации для бесшумного исполнения функционального предназначения. Специфика такого пути в том, что движением колеса создаются вибрация рельса и шум, которые тут же гасятся обжатием с демпфированием. Баланс между возникновением шума и его гашением достигается соотношением длин плеч полушпалы как рычага. Условием появления сдвига сил обжатия в направлении от вертикального плеча полушпал служат неодинаковые осадки горизонтального плеча полушпалы L-образной формы и внецентренное ее нагружение. В результате исследований установлены преимущества рельсового пути с обжатием рельса, что является гарантом устойчивости расчетных параметров при продолжительной эксплуатации пути. Стоимость рельсового пути с обжатием рельса в результате экономии стали, снижения расходов на производство работ и эксплуатационные потребности уменьшается в два раза.

**Ключевые слова:** рельс, обжатие, эффект обжатия рельса, полушпала L-образного сечения, гашение шума, рельсовая нить, цельный участок, механизм обжатия

**Для цитирования:** Суходоев, В. Н. Рельсовый путь с обжатием рельса / В. Н. Суходоев // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 3. С. 234–242. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-234-242>

## Rail Track with Rail Compression

V. N. Sukhodoev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The problem of damping the noise on the track, arising from the movement of the train, is solved sufficiently but it is simple, if the rail with spacers is laid inside the longitudinally located band sleeper-mechanism. The result is a layered rail thread, consisting of belts: a rail tape with elastic spacers on three sides, a tie-mechanism tape and a ballast layer. The unity of the layers is carried out due to their own mass. This is the static track without external load. Rail compression is an effective property of rail tracks. It is formed in the sleeper mechanism under the influence of vertical forces with displacements and their horizontal derivatives. When loading the track, the compression is carried out repeatedly with subsequent unloading. In this case, each previous changes in the conditions in work of the track are taken into account in the subsequent cycle of loading and unloading. A rail track with a rail compression is a kind of self-adapting linear system, which is necessary with frequent changes in load and operating conditions for silent performance of a functional purpose. The specificity of this path is that the movement of the wheel creates rail vibration and noise, which are immediately damped by compression with damping. The balance between the occurrence of noise and its suppression is achieved by the ratio of the lengths of half-sleeper shoulders as a lever. The condition for the appearance of a shift of the compression forces in the direction from vertical shoulder of the half-sleepers is the unequal settlements of the horizontal shoulder of the L-shaped half-sleepers and its eccentric loading. As a result of the research, the advantages of a rail track with rail compression have been revealed, which is

### Адрес для переписки

Суходоев Валерий Николаевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/3,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-93-04  
vm3\_ftk@bntu.by

### Address for correspondence

Sukhodoev Valeriy N.  
Belarusian National Technical University  
65/3, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-93-04  
vm3\_ftk@bntu.by

a guarantor of the stability of the design parameters during long-term operation of the track. The cost of a rail track with rail reduction is halved as a result of steel savings, lower labor costs and operational needs.

**Keywords:** rail, compression, rail compression effect, half-sleeper with L-shaped section, noise suppression, rail thread, solid plot, compression mechanism

**For citation:** Sykhodoev V. N. (2021) Rail Track with Rail Compression. *Science and Technique*. 20 (3), 234–242. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-234-242> (in Russian)

## Введение

Рельс с прокладками внутри продольно расположенной ленточной шпалы-механизма образуют слоистую рельсовую нить. В статике единение слоев осуществляется благодаря собственной массе. В динамике, которую создает накат груженого колеса, происходит постепенно нарастающее единение рельса с ленточной шпалой обжатием и практически одновременно гасятся образованные накатом колеса вибрация рельса и шум.

Цель исследований – создание конструкции бесшумного ленточного рельсового пути с обжатием рельса, изучение специфики обжатия рельса и демпфирования шума, выявление закономерностей, на базе которых можно создавать бесшумные рельсовые пути.

## Описание работы ленточного рельсового пути

Движение поезда по рельсовому пути сопровождается шумом и вибрацией рельса. Следует отметить, что металлический рельс не зазвучит, если осуществлять единение его с массой железобетонной шпалы-механизма и массой основания из балласта и грунта при каждом накате колеса с последующей разгрузкой. Решается такая проблема просто – прокладкой рельсов внутри продольно расположенных ленточных шпал-механизмов.

В процессе наката колеса с грузом в рассчитываемом сечении происходит постепенное увеличение загрузки и упругих подвижек. Рельс по вертикали загружается колесом с грузом с ответной реакцией основания, по горизонтали – производными вертикальных сил (силами обжатия с подвижками). Таким образом, при каждом накате колеса происходит сжатие рельса в двух плоскостях, единение его с массой железобетонной шпалы-механизма и массой основания из балласта и грунта. То есть рассматриваемый ленточный путь характеризуется обжатием рельса, демпфированием, гашением шума и вибрацией. Подвижки сил обжатия в шпале-механизме ограничены величиной

деформации боковых прокладок рельса и возможностями производных сжимаемости основания.

Формируется цельный участок в зоне колеса с грузом, и по нему принимаются координаты рассчитываемого сечения рельса и рельсовой нити. Отметим, что в зоне загрузки сосредоточенной силой данное сечение располагается под колесом. На цельном участке рельсовой нити под грузом обжатый рельс работает в условиях, аналогичных работе жесткой арматуры в бетоне. Это максимальная статика процесса единения. Динамическое единение рельсовой нити с повторностью – объект разработки, исследования и систематизации результатов с целью получения гарантированных условий обжатия рельса и демпфирования для гашения шума [1–12] при движении поезда по трассе с возможными изменениями грунтовых условий либо схемы или величины загрузки.

Своеобразный шум образуется при движении поезда по рельсам с постоянной скоростью, например, электрички на прямых участках пути. Движение трамвая в городских условиях происходит с частым изменением скорости и шумом, движение поезда метро – с шумом, который усиливается в ограниченном пространстве [13]. Отсюда вывод: нужно гасить шум в момент его возникновения. Наиболее простое решение – обжатие рельса на длине цельного участка рельсовой нити при накате груженого колеса.

Упругое сопротивление зернистой среды возможно при небольших ее деформациях – доли миллиметров сжимаемости основания цельного участка [7]. Условием появления достаточно значимых подвижек, т. е. сдвига сил обжатия в направлении от вертикального плеча полушпал, служат неодинаковые осадки горизонтального плеча полушпалы L-образной формы и внецентренное ее нагружение. Для обжатия подходит основание из натуральных материалов (щебня, грунта) с неизменными характеристиками, либо основание-конструкция, обладающее постоянными свойствами. Дополнительные факторы, влияющие на вели-

чину подвижек, – характеристики полушпалы-рычага и сжимаемость основания.

На протяжении 220 лет продолжают разработку и внедрение рельсовых путей, уложенных на поперечно расположенные шпалы, а также 20 лет после патентования [14] разрабатывается рельсовый путь с обжатием рельса. Конкуренцию последнему обеспечивают простота конструкции рельсовой нити и пути в целом, доступная технология строительства и обжатия рельсов, бесшумность работающего пути, меньшая стоимость, а также улучшенная защита балласта от загрязнения и рельса от внешней агрессивной среды. Все это – в процессе качения колеса без привлечения дополнительных ресурсов.

Если в рельсовом пути изменить конструкцию шпального фундамента [14], для чего рельс уложить не по верху поперечно расположенных шпал, а на горизонтальные плечи L-образной формы ленточных полушпал в составе шпал-механизмов, тогда прерывистый фундамент рельсовой нити будет заменен ленточным фундаментом с новыми эффективно работающими свойствами. Специфика работы системы проявляется каждый раз при накате колеса и единении контактирующих слоев рельсовой нити в одно целое. Такие две рельсовые нити образуют конструкцию ленточного рельсового пути [13], где создание условий образования обжатия рельса и демпфирования шума в процессе строительства рельсовой нити сделает рельсовый путь бесшумным при эксплуатации. Итак, если заменить шпальный фундамент с поперечно расположенными шпалами и уложенными по ним рельсами на продольно расположенные ленточные шпалы-механизмы с вложенными рельсами, появляется возможность гасить шум обжатием рельса одновременно с накатом колеса, создающего шум.

Энергия наезжающего колеса расходуется на упругое обжатие половины длины цельного участка впереди колеса и на высвобождение упругих сил при откате. Следующий накат колеса осуществляется на уже бывшее в употреблении сечение и восстановленное в процессе отката колеса освобожденными силами упругости в первоначальное состояние с учетом износа, происходит притирка поверхностей качения сосредоточенными силами. Совершается цикл «нагрузка – разгрузка» с частотой и скоростью проезжающих поездов. Многократный цикл «нагрузка – разгрузка» рельса

создает самоприспособление рельсовой нити к меняющимся внешним воздействиям.

Хороший результат дают обжатие рельса с упругими прокладками на его стенке, механический стык рельсов, балласт, а обжатием с демпфированием достигается бесшумность. Обжатые механические стыки рельсов становятся жесткими и безударными. В сравнении с жесткостью одиночного рельса на шпальной решетке вертикальная жесткость обжатой рельсовой нити в три-четыре раза больше, а ее жесткость по горизонтальному направлению увеличивается в 60–70 раз. Единение рельсовой нити с основанием усилено заглублением, а также увеличением длины слоев рельсовой нити. Эти факторы предупреждают, кроме того, сдвиг рельсов от угона.

В [13] специфические отличия нового пути, его технические, экологические и экономические преимущества показаны на примере конструкции трамвайного пути с эффектом обжатия рельса. Авторы [13] систематизировали сведения, приведенные в [1–4, 13–15], и дополнили их информацией о слабых местах новой конструкции пути. При этом термин «эффект обжатия» отличается от термина «эффект граблей» только названием. В [13] расчеты рельсовой нити произведены с осредненными исходными значениями: сила обжатия по горизонтали 17,5 % груза, коэффициент трения бетона по щебню балласта 0,3. Результаты расчетов с использованием гипотезы Фусса – Винклера и уравнения равновесия статики подтверждают аналогичные расчеты, выполненные с помощью метода конечных элементов. Роль массы рельса оценивалась соотношением массы груза и рельса на длине цельного участка.

По мере наката колеса с грузом к рассчитываемому сечению происходит увеличение его загрузки по эпоре растущего треугольника с ориентировочной длиной основания  $3d$ , соответственно увеличиваются силы обжатия рельса и гашение шума. Груз колеса распределяется рельсовой нитью по эпоре равнобедренного треугольника, составленного из двух прямоугольных симметрично расположенных относительно расчетного сечения треугольников под колесом [15]. Высота треугольника равна значению груза, длина основания  $6d$  – расчетной длине цельного участка как функции силового фактора [13]. Аналогично происходит изменение суммарной жесткости сечения рельсовой нити и сил обжатия. В результате возникает стабильность напряженно-деформированного

состояния пути, увеличивается продолжительность его эксплуатации, а также устанавливается низкий уровень шума.

Необходимость установки поперечных связей между полушпалами в основном диктуется технологичностью транспортных и монтажных работ. Если в процессе эксплуатации произойдет раздвижка полушпал в шпале-механизме, это приведет к увеличению эксцентриситета нагрузки и росту сил обжатия. Если в эксплуатационный период происходят износ частей рельсового пути, некоторое нарушение плотности их взаимодействия, появление шума, то они просто устраняются в процессе повторного цикла «нагрузка – разгрузка».

Полушпала – железобетонная балка с поперечным сечением L-образной формы, работает в составе шпалы-механизма, служит конструктивным элементом, преобразующим вертикальные силы и сжимаемость основания в силы обжатия и их подвижки. При этом величина подвижек сил обжатия превышает значение деформации боковых прокладок, что гарантирует обжатие. Существенным для процесса обжатия является внецентренное нагружение горизонтального плеча полушпал. Неодинаковая сжимаемость основания при внецентренном нагружении полушпалы сопровождается неравномерной ее осадкой и наклоном горизонтального плеча. Отсюда – крен вертикального плеча и горизонтальные подвижки (перпендикулярные ему) сил обжатия, распределенные по эпюре треугольного очертания.

В процессе исследований для удобства вычислений и анализа результатов произведена замена распределенной нагрузки равнодействующими – горизонтальной силой обжатия и ее подвижкой. Аналогично выполнена замена реактивного давления основания на горизонтальное плечо полушпалы. В результате полушпала получила свойства рычага L-образной формы, что упростило исследование и вариантное проектирование производных сил и перемещений. Закономерности движения полушпалы характеризуют определенность движения звеньев и сил рельсового пути новой конструкции. Сдвоенные полушпалы образуют шпалу-механизм, в которой при накате колеса создается плотное единение с вложенным рельсом.

Шпала-механизм – ленточный фундамент с разъемом внизу и канавкой в верхней части. Состоит из двух железобетонных полушпал, смонтированных по разные стороны шейки рельса. Вариант проектного решения железобе-

тонной шпалы-механизма под нагрузку 70 кН изложен в ТУ РБ 100649841.338–2003 «Шпалы-механизмы железобетонные сборные». С целью гарантированного наклона ее и крена вложенного в канавку рельса образуют шпалу-механизм из полушпал разной ширины. Это позволяет изменением ширины постелей полушпал регулировать величину крена рельсовой нити и вложенного рельса.

Встречный крен рельсовых нитей на цельном участке необходимо устраивать для сохранения проектной ширины колеи от действия изменчивой по величине динамической нагрузки проезжающих поездов. Это автоматически срабатывающая регулировка вместо нерегулируемого наклона рельса при строительстве пути на шпальной решетке. Постоянство колеи сохраняется сопротивлением поперечному сдвигу по балласту и грунту основания заглубленных в грунт длинных рельсовых нитей. Некоторый аналог – сопротивление сдвигу поперечно расположенной в составе шпальной решетки короткой шпалы продольному угону рельса.

Массивная шпала-механизм на длине цельного участка обжатием «навешивается» на длинный рельс, при этом коэффициент устойчивости на опрокидывание рельса увеличивается (например, устойчивость Р43 – до 3,26 с устойчивости 1,63) [3, 4].

Проведены натурные испытания отрезка рельсового пути, сравнимого с длиной цельного участка. Результаты – положительные, на них не сказались даже впервые выполненная подготовка участка [4]. Это характеризует устойчивость рельсового пути с обжатием. В технологии изготовления шпалы-механизма проявились технологические неудобства заполнения формы бетоном вручную. Форма раскрылась легко, а это – фактор технологичности ремонтных работ по замене рельса с изношенной головкой.

Обжатие – процесс единения рельса и шпалы-механизма сжатием вертикальными силами наезжающего колеса и реакции основания, сжатием с боков через полушпалы горизонтальными силами с подвижками, демпфированием вибрации и шума. Значимое обжатие происходит на длине цельного участка по мере наката колеса с грузом с участием рычагов L-образной формы (полушпал) вместе со сжимаемостью основания рельсовой нити. Безотказное действие сил обжатия и их подвижки можно гарантировать потому, что создаются они преобразо-

ванием полушпалами прочностных и упругих свойств вертикально деформируемого основания шпалы-механизма, нормируемого.

Подвижки сил обжатия – производные сжимаемости основания. Задача – формирование возможной подвижки силы обжатия по величине, равной деформации сжатия этой силой вертикальной прокладки, уложенной сбоку шейки рельса. На рельсовом пути с обжатием рельса задача решалась с большим запасом. Мощность основания полушпалы во много раз превышала толщину боковых прокладок, поэтому сжимаемость основания была больше деформации боковых прокладок. Этим превышением гарантируются обжатие рельса и самоприспособление рельсовой нити к меняющимся внешним условиям в процессе длительной эксплуатации. Кроме того, можно рассматривать варианты устройства основания [3] и преобразовывающие возможности полушпалы-рычага. Например, подвижка на уровне равнодействующей сил обжатия составила 1,1 мм при осадке от сжимаемости основания 0,4 мм [13].

На момент переката колеса через расчетное сечение рельсовая нить приобретает свойства балки с жесткой арматурой и погашенным обжатием и демпфированием шума. Далее происходит уменьшение силы обжатия с разуплотнением слоев, что позволяет погасить вибрации и шум на длинном рельсе. Значительные обжатие и разуплотнение образуют в сумме нагруженный участок рельсовой нити – цельный участок в зоне воздействия колеса на длине около  $6d$  [1, 2]. Здесь  $6d$  – длина первой волны прогибов рельсовой нити с максимальным прогибом, остальные волны прогибов рельсовой нити практического значения не имеют [3, 13]. Кроме того, упаковывая рельс в бетон через упругие прокладки по трем сторонам, снижаются напряженно-деформированное состояние рельсовой нити в целом и воздействие рельса на бетон через контактирующие поверхности, в связи с чем уменьшается уровень производимого колесом и рельсом шума. Такая ситуация – следствие перехода на распределенную передачу сил между слоями и на ленточные элементы в конструкции пути. В данном случае лента выделяется как объект, формирующий рельсовый путь с обжатым рельсом: лента балластного слоя, лента рельсовой нити, лента шпалы-механизма, лента рельса. Поэтому предлагаемый рельсовый путь – путь без концентрации напряжений и деформаций с увеличенным ремонтным периодом.

Ленточное единение со шпалой-механизмом обеспечивается без концентраторов, т. е. без отверстий, болтов и костылей. Рельс в конструкции пути с обжатием не испорчен отверстиями под болты скрепления. На рельсовом пути с обжатием рельса не происходит накопление остаточных деформаций, поскольку рельсовая нить после каждого нагружения-разгрузки автоматически восстанавливается с учетом износа, т. е. срабатывает самоприспособление системы. За пределами цельного участка собственный вес рельса предохраняет рельсовую нить от образования щелей между слоями и от загрязнения.

Износ головки рельса поначалу улучшает контакт поверхностей качения колеса и рельса, осуществляется притирка. Однако колеса поезда имеют разное состояние наката. Поэтому контакт колеса и рельса не постоянен. Возрастает роль обжатия, являющегося фактором единения слоев, улучшенной передачи динамической нагрузки на основание.

Бесшумность гарантируется обжатием рельса с демпфированием шума, а также правильным исполнением обозначенных факторов. Рельсы, зажатые в железобетонной шпале-механизме, теряют возможность вибрировать. В двух плоскостях возрастают несущая способность и устойчивость рельса, поэтому часть его функций принимает шпала-механизм. Отсюда – возможность уменьшения массы рельса, отсутствие потребности в крепежных деталях. Надежность гарантируют простота конструкции и обжатие рельса внецентренным нагружением, отсутствие мест концентраторов, удобство качественной укладки ленточного рельсового пути с обжатием рельса.

Величину силы обжатия следует находить из уравнения моментов относительно горизонтальных связей полушпал, расположенных в шпале-механизме на уровне толщины защитного слоя из бетона [13]. Обжатие рельса усиливается, если уменьшать высоту шпалы-механизма при неизменной ширине.

В научных трудах разработаны и предлагаются к обсуждению специальные термины с описанием их содержания, характеризующие конструкцию бесшумного рельсового пути, сопутствующий потенциал его развития на городском общественном транспорте. Термины служат пособием для написания разрабатываемой нормативно-технической документации проектирования, строительства и эксплуатации бесшумных рельсовых путей с обжатием рельса.

Эффект обжатия – результат обжатия рельса на длине цельного участка с демпфированием шума. Эффект обжатия можно увеличить, если применить трапециевидную форму поперечного сечения [8–12, 14] рельсовой нити (резерв). При этом создается обжатие и самой шпалы-механизма, увеличиваются сила обжатия и обжатие вложенного в шпалу рельса, но под действием вибрации ослабевает стабильность единения рельсовой нити с балластом. Из чего следует, что сначала нужно рассматривать и анализировать работу шпалы-механизма прямоугольного сечения.

Проектирование рельсового пути с обжатием рельса под заданную нагрузку включает расчет рельсовой нити как балки на упругом основании с помощью гипотезы Фусса – Винклера [13]. Если учитываются распределенные силы обжатия по высоте вертикального плеча полушпалы, расчет производится по методу конечных элементов. Также с помощью этого метода рекомендуется выполнять расчет рельсовой нити в случае конструирования основания или расчет рельсовой нити и железобетонной шпалы-механизма при изгибе с кручением.

Длинные конструктивные элементы оценивают по свойствам и параметрам участка «единичной» длины. За такой участок на рельсовой нити принята длина первого участка из волн ее прогибов [13], определенных по методу расчета балки на упругом основании. С использованием гипотезы Фусса – Винклера вычисляют ее длину и прогиб максимального значения. Параметры волны, симметрично расположенной относительно линии действия груза, характеризуют рельсовую нить в максимально нагруженном, но безопасном состоянии. Поэтому ее длина принимается за расчетную длину цельного участка.

Цельный участок – это обжатый участок рельсовой нити с улучшенными параметрами, со свойствами, по которым можно оценивать рельсовую нить в нагруженном состоянии. Движение колеса по рельсу сопровождается непрерывным образованием и смещением цельных участков со скоростью перемещения груза. Для описания многократного образования на рельсовой нити цельных участков с процессом самоприспособления обжатия подходит словосочетание «механизм обжатия».

Механизм шпалы-механизма – это подвижно соединенные полушпалы, совершающие под действием приложенных сил определенные движения в двух плоскостях. Механизм рель-

совой нити приводится в действие нарастающей нагрузкой при накате колеса и убывающей нагрузкой при его откате. Соответственно, при наезде происходит единение слоев, при откате сработает разуплотнение контактов. Единение и разуплотнение слоев – регулируемые факторы при выборе допустимого уровня шума в окружающую среду.

Многократный цикл «нагрузка – разгрузка» рельсовой нити – механизм стабильности параметров рельсового пути с обжатием рельса для безопасности поездок в эксплуатационный период. Многократным обжатием разнородных слоев механизм придает слоеной конструкции рельсовой нити необходимые для рельсового пути свойства. Механизм восстанавливает функциональные параметры рельсовой нити до уровня исходных (проектных), сохраняет условия эксплуатации, реагирует на появление дефектов в работе элементов пути.

При передаче основанию энергии удара существенно возрастает роль контакта слоев и массы. На площади цельного участка суммарно улучшенный контакт с балластом подошвы двух ленточных параллельно расположенных шпал-механизмов эффективнее включает массу грунта в гашение шума в сравнении с такой же величиной суммарной площади контакта подошвы из поперечных, прерывисто разложенных шпал. Менее заглубленные шпалы, короткие, с большим количеством углов на площади контакта – это концентраторы напряжений и деформаций [5, 13].

В упругой стадии многократные (даже минимальные) перемещения расшатывают систему рельсового пути, уложенного на поперечно расположенные шпалы. В связи с чем ремонтная служба пути должна восстанавливать его исправное состояние. На рельсовом пути с обжатием рельса совершается процесс самовосстановления исправного состояния, поэтому многократно повторяемые подвижки не расшатывают систему рельсового пути, уложенного на продольно расположенные шпалы. Образуется цельный массивный участок, поглощающий вибрацию или передающий ее на балласт и грунт с меньшим количеством концентраций напряжений и деформаций.

Вне пределов цельного участка рельсовая нить состоит из лент без жесткой связи между слоями. Единение слоев образуется массой расположенного выше слоя. Непостоянство жесткости рельсовой нити за пределами цельного участка эффективно скажется на погаше-

нии вибрации, поступающей вдоль по рельсу от источника, находящегося за его пределами.

Угон пути – продольное смещение железнодорожных рельсов в сторону движения, вызванное продольными усилиями в рельсовых нитях, возникающими при движении поездов от ударов колес в концы рельсов на стыках, при торможении подвижного состава. На рельсовом пути с обжатием не образуется угон рельсов. Практически нет колебаний и изгиба рельсов со смещением опорных сечений, свойственных рельсовой нити, состоящей только из рельса на шпальной решетке с допускаемым его прогибом 2–4 мм. На новом пути в обжатом стыке не увеличивается зазор; обжатый стык работает как цельный рельс.

По Г. Амонтоу, силы сопротивления сдвигу зависят от коэффициента трения и давления и не зависят от размеров контактных поверхностей. Коэффициент трения металлического рельса по прессованной резине прокладок, уложенных по бокам шейки рельса и под подошвой, больше коэффициента трения металлического колеса по металлу рельса. Поэтому угон рельса и любого другого слоя в ленточном рельсовом пути не образуется даже при появлении сдвигающей силы торможения или разгона.

При упаковке рельса (с прокладками из прессованной резины по сторонам шейки рельса и с прокладками под его подошвой) в железобетонную шпалу-механизм увеличивается устойчивость рельса и рельсовой нити, практически исключаются боковые силы трения, но срабатывают силы трения по подошве.

**Пример.** Рельсовый путь с обжатием рельса, торможение колеса. Силы сдвига, силы трения – металл колеса по металлу головки рельса. Силы сопротивления уgonу – металл подошвы рельса по уплотненной прорезиненной прокладке. Из-за различия коэффициентов трения образуется больше сил сопротивления сдвигу, т. е. угона нет. А если нет угона, то нет и сдвига по контактным поверхностям шейки рельса резиновых прокладок, нет горизонтальных боковых продольных сил трения.

В упругой постановке задачи продольные боковые силы трения проявятся после преодоления сил трения по подошве. Иначе эти силы не работают и составляют резерв. Вертикальные подвижки рельса ограничены деформациями (амплитудой) прокладки под подошвой рельса на длине цельного участка. Колебаться – значит, раскачиваться сверху вниз. Например, в трамвайном пути рельсовая нить с обжатием

имеет амплитуду 0,4 мм [13], значение которой мало, поэтому нет условий для образования колебаний рельса, работающего совместно с железобетонной упаковкой, как невозможно раскачать механическое единение слоев рельсовой нити, работающее в системе «обжатие – отжатие» совместно с массой основания из балласта и грунта при многократном цикле «нагрузка – разгрузка».

Вывод – угон рельсов не образуется по нескольким причинам. Из-за увеличения через обжатие массы рельса массой железобетонной шпалы-механизма исключается его вибрация. Практически исключен его прогиб благодаря увеличению жесткости рельсовой нити. Коэффициент трения прорезиненной прокладки под подошвой рельса больше, чем колеса по рельсу. Удар колеса в торец принимающего рельса, зажатого обжатием в железобетонной шпале-механизме, возможен при наличии большого зазора и как исключение. За пределами цельного участка слои рельсовой нити разной жесткости если и вибрируют, то неодинаково, и не могут создать резонанс колебаний.

В рельсовом пути с обжатием на участке перекатывания колеса механическое единение рельсов сработает как сварной стык, если соединение будет обжато и усилено шпалой-механизмом. Схема соединения может быть в разных вариантах исполнения. Рассмотрим возможный случай. В процессе эксплуатации в рельсе появилась трещина, такое место можно сравнить с устройством механического стыка рельсов торцами. Несущая способность рельсовой нити не уменьшилась. Исходя из условия восстановления прочности рельсовой нити, ремонт не требуется. Но для рельсового пути с обжатием, учитывая его новизну, нужно выбрать тип электрического соединения с учетом его обжатия в механически обжатом стыке рельсов. Как вариант, представляет интерес устройство контактного электрического соединения по правилу вилки с розеткой. Такое соединение не требует выполнения сварочных работ на линии, но является временным.

Производимый рельсом шум уменьшается поглощением колебаний массой шпалы-механизма, балласта и грунта – как результат улучшенных обжатием контактов ленточных слоев. При этом сопутствующие факторы с гарантией обеспечивают небольшое, без образования щелей между слоями рельсовой нити, но постоянное обжатие также и за пределами цельного участка. То есть регулируемое гашение шума на рельсовом пути с обжатием рельса

осуществляется в процессе обжатия рельса на цельном участке производными груза и сопутствующих факторов, нерегулируемое – только собственной массой слоев.

Рельс и длинная железобетонная шпала-механизм – ленты с постоянными свойствами, еще один фактор бесшумности. Такие ленты на рельсовом пути с обжатием рельса обеспечат конечную цель: рельсовая нить – постоянство сжимаемости на всем пути.

Звукопоглощающая среда рельсового пути с обжатием – это звукопоглощение, звукоизоляция, демпфирование. Звукопоглощающие свойства акустических материалов обусловлены пористой структурой, наличием большого числа открытых, сообщающихся между собой пор (например, балласт из щебня, материковый грунт, искусственные материалы). Большая разновидность свойств этих материалов используется при конструировании основания из них [13].

Звукоизоляция достигается шумозащитными экранами из железобетонных вертикальных стенок канавки, упругими прокладками по бокам шейки рельса и под подошвой, т. е. звукоизоляцией его упругими прокладками и железобетонным обрамлением с трех сторон.

В холодное время года в два-три раза увеличивается жесткость пути вследствие промерзания земляного полотна, балластного слоя, снижения упругости резиновых прокладок. Но вместе с этим резко возрастет динамика воздействия колеса на промерзшие элементы пути: вибрация и деформация слоев будут способствовать разрушению промерзания, восстановлению свойств слоев и их единению. Резкие колебания температуры может сгладить работа рельса в массе железобетонной шпала-механизма. Так, при охлаждении происходит выправление рельса растяжением, при повышении температуры головка рельса открыта для лучей солнца, шейка и подошва закрыты в бетоне. Имеет место взаимовлияние различных деформаций, но без выброса пути.

## ВЫВОДЫ

1. Установленные преимущества рельсового пути с обжатием рельса служат гарантом устойчивости его работы в процессе эксплуатации:

– простота конструкции обеспечивает удобство для качественного и безопасного исполнения ленточного единения рельса со шпала-механизмом обжатием без крепежных деталей,

а также самовосстановление обжатия при постоянном износе пути;

– безопасность поездок по рельсовому пути с обжатием рельса усилена и гарантируется работой длинных рельсовых нитей, которая отличается от работы шпальной решетки из коротких, поперечно разложенных шпал и рельса по ним;

– устойчивость колеи и основания достигается работой длинных рельсовых нитей со встречным наклоном подошв и встречным креном рельсов, стабильностью сопутствующих факторов, таких как внецентренное нагружение рельсовых нитей, сжимаемость основания и преобразующая полушпала-рычаг.

2. Рельсовые пути с обжатием создаются и работают по известным закономерностям, поэтому нет проблем с их внедрением. Простая по устройству ленточная конструкция рельсовой нити – основа проектирования бесшумных рельсовых путей с обжатием рельса для различных видов городского транспорта (трамвая, метро, железной дороги).

3. Выполненные исследования доказывают, что рельсовый путь с обжатием рельса благодаря простоте исполнения и эффективности в процессе работы может быть одним из условий решения транспортных проблем города с гарантией безопасности и бесшумности. При этом период строительства километра пути – один-два месяца. Новизна проекта подтверждена патентами Республики Беларусь и Российской Федерации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Суходоев, В. Н. Ленточный путь избавления от грохота / В. Н. Суходоев // Ахова працы. 2001. № 6. С. 28–29.
2. Суходоев, В. Н. О надежности и долговечности ленточного трамвайного пути / В. Н. Суходоев // Перспектива развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: Междунар. сб. науч. тр. Гомель: БелГУТ, 2005. С. 120–122.
3. Суходоев, В. Н. О прочности скрепления рельса со шпалой механизмом в ленточном трамвайном пути / В. Н. Суходоев // Инновационные технологии в строительстве автомобильных дорог, мостов и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2008. С. 356–367.
4. Суходоев, В. Н. Результаты натурных испытаний шпала-механизма и отрезка ленточного трамвайного пути / В. Н. Суходоев, Р. С. Юрения, В. В. Коробан // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2006. Т. 1. С. 405–407.



5. Суходоева, Н. В. Зависимость интенсивности шума от величины обжатия рельса / Н. В. Суходоева, А. Е. Кончиц, А. В. Трушкина // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2012. Т. 2. С. 225.
  6. Тимошенко, С. П. Сопротивление материалов / С. П. Тимошенко. М: Наука, 1965. Т. 2. С. 18–20.
  7. Соболевский, Д. Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта / Д. Ю. Соболевский. Минск: Наука і тэхніка, 1994. 232 с.
  8. Байков, В. Н. Железобетонные конструкции / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. М.: Стройиздат, 1985. 368 с.
  9. Суходоев, В. Н. Алгоритм и программа расчета силы обжатия рельса / В. Н. Суходоев, Л. В. Конотоп, М. В. Кравченко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2012. Т. 2. С. 224.
  10. Сосянц, В. Г. Рельсовые пути и дороги / В. Г. Сосянц. М: Стройиздат, 1965. С. 117, 145–148.
  11. Мелентьев, Л. П. Об оптимальном соотношении механических свойств элементов верхнего строения пути / Л. П. Мелентьев // Совершенствование конструкций пути и стрелочных переводов: тр. ЦНИИ МПС. М.: Транспорт, 1973. Вып. 501. С. 31–35.
  12. Смолин, Ю. П. Напряжения в земляном полотне от поездной нагрузки / Ю. П. Смолин // Известия вузов. Строительство. 1997. № 7. С. 98–101.
  13. Суходоев, В. Н. Эффект обжатия нагружаемого рельса полупалами L-образного сечения и трамвайный путь / В. Н. Суходоев, А. В. Трушкина, Н. В. Лапенок // Наука и техника. 2015. № 3. С. 79–86.
  14. Рельсовый путь: пат. Респ. Беларусь № 3262: МПК E01 B 2/00, E 01B 21/00 / В. Н. Суходоев, А. В. Трушкина. Оpubл. 30.03.2000.
  15. Суходоев, В. Н. Конструкция трамвайного пути с эффектом граблей / В. Н. Суходоев // Геотехника Беларуси: наука и практика: материалы МНТК. Минск: БНТУ, 2013. Ч. 2. С. 276–290.
- Поступила 13.01.2020  
Подписана в печать 18.08.2020  
Опубликована онлайн 31.05.2021
- REFERENCES
1. Sukhodoev V. N. (2001) Rumble Disposal Belt. *Akhova Pratsy* [Labour Protection], (6), 28–29 (in Russian).
  2. Sukhodoev V. N. (2005) About Reliability and Durability of a Tape Tram Track. *Perspektiva Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitel'stve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov v Respublike Belarus': Mezhdunar. Sb. Nauch. Tr.* [Prospects for the Development of New Technologies in Construction and Training of Engineering Personnel in the Republic of Belarus: International Collection of Scientific Works]. Gomel, Belarusian State University of Transport Publ. 120–122 (in Russian).
  3. Sukhodoev V. N. (2008) On Strength of Fastening a Rail to a Sleeper with the Help of a Mechanism in a Belt Tram Track. *Innovatsionnye Tekhnologii v Stroitel'stve Avtomobil'nykh Dorog, Mostov i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov v Respublike Belarus': Materialy 6-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Innovative Technologies in the Construction of Roads, Bridges and Training of Engineering Personnel in the Republic of Belarus: Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 356–367 (in Russian).
  4. Sukhodoev V. N., Yurenina R. S., Koroban V. V. (2006) Field Test Results of a Sleeper-Mechanism and a Section of Belt Tram Ways. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 3-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science for Education, Production, Economics: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Scientific and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 405–407 (in Russian).
  5. Sukhodoeva N. V., Konchits A. E., Trushkina A. V. (2012) Dependence of Noise Intensity from the Amount of Rail Compression. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 10-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Science for Education, Production, Economics: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 225 (in Russian).
  6. Timoshenko S. P. (1965) *Resistance of Materials. Vol. 2*. Moscow, Nauka Publ. 18–20 (in Russian).
  7. Sobolevskii D. Yu. (1994) *Strength and Bearing Capacity of Dilating Soil*. Minsk, Navuka i Tekhnika Publ. 232 (in Russian).
  8. Baikov V. N., Sigalov E. E. (1985) *Reinforced Concrete Structures*. Moscow, Stroizdat Publ. 368 (in Russian).
  9. Sukhodoev V. N., Konotop L. V., Kravchenko M. V. (2012) Algorithm and Program for Calculating Rail Compression. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 10-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 2* [Science for Education, Production, Economics: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 224 (in Russian).
  10. Sosyants V. G. (1965) *Railways and Roads*. Moscow, Stroizdat Publ. 117, 145–148 (in Russian).
  11. Melentiev L. P. (1973) On Optimal Ratio of Mechanical Properties in Elements of Track Superstructure. *Sovershenstvovanie Konstruktsiy i Strelochnykh Perevodov. Tr. TsNII MPS* [Improvement of Track and Turnout Designs: Proceedings of Central Research Institute of the Ministry of Railways]. Moscow, Transport Publ. (501), 31–35 (in Russian).
  12. Smolin Yu. P. (1997) Stresses in Subgrade from Train Load. *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo = News of Higher Education Institutions. Construction*, (7), 98–101 (in Russian).
  13. Sukhodoev V. N., Trushkina A. V., Lapionok N. V. (2015) Squeezing Effect of Rail Loaded by Semi-Sleepers Having L-Shaped Cross-Section. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 79–86 (in Russian).
  14. Sukhodoev V. N., Trushkina A. V. (2000) *Rail Track: Patent of the Republic of Belarus No 3262* (in Russian).
  15. Sukhodoev V. N. (2013) Tram Track Design with Rake Effect. *Geotekhnika Belarusi: Nauka i Praktika: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Ch. 2* [Geotechnics of Belarus: Science and Practice: Proceedings of International Scientific and Technical Conference. Part 2]. Minsk, Belarusian National Technical University Publ. 276–290 (in Russian).
- Received: 13.01.2020  
Accepted: 18.08.2020  
Published online: 31.05.2021