

Демпфирование динамических сил материалами, применяемыми при строительстве балластного и безбалластного пути. Щебень

В. М. БЕЛЬКОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы прочностных свойств минеральных материалов, применяемых в конструкции железнодорожного пути. В ходе эксплуатации происходит постепенное изменение, деградация свойств минеральных материалов при засорении порового пространства щебеночной призмы мелкой фракцией, нефтепродуктами и растительными остатками. Изменяются демпфирующие свойства щебеночного балласта и бетонного основания в безбалластной конструкции пути. Автором проведены расчеты коэффициентов демпфирования щебня и определены их значения для спектральной плотности нагружающей силы, возникающей при взаимодействии колесных пар с верхним и нижним строениями пути. Выбраны материалы в качестве подшпальных демпферов и стабилизаторов границы раздела «щебень — песок», обеспечивающие минимальные напряжения на грунты под железнодорожным полотном и снижающие просадки пути.

Ключевые слова: упруговязкопластические свойства материалов; демпфирование; вертикальные вибрационные волны; слоистые материалы; щебень

Введение. В ряде статей [1, 2, 3, 4, 5], посвященных проблеме демпфирования вибраций, возникающих в земляном полотне под действием проходящих поездов, на основе теории волновых процессов получены выражения, позволяющие оценивать величины смещений, деформаций и напряжений в слоистых системах и на границах слоев. Устойчивость конструкций со щебеночным балластом на суглинистом грунте и их межремонтный срок зависят от правильной организации водостоков в весенне-осенний период. Конструкции пути на щебеночном балласте имеют лучшие демпфирующие свойства и более низкую стоимость по сравнению с конструкциями с железобетонным основанием. Балластная призма оказывает необходимое сопротивление вертикальным, боковым и продольным нагрузкам, равномерно распределяет воспринимаемое от рельсовых опор давление на большую поверхность земляного полотна, амортизируя ударные и вибрационные воздействия проходящего подвижного состава. Щебеночное основание оказывает положительное влияние на срок службы и на геометрию пути, а значит, и на эффективность текущего содержания верхнего строения пути.

Бетон, даже высокодисперсный, имеет дефектную структуру: открытые щелевые капилляры и закрытую пористость, которые являются концентраторами напряжений и дефектов. Поглощение открытыми поровыми каналами бетона осадков и последующее замерзание в них воды при отрицательных температурах приводит к резкому повышению давления в порах и увеличению размеров трещиноватой пористости. Поэтому бетон не относится к морозостойким материалам и склонен к трещинообразованию, особенно в резко континентальном климате (рис. 1) [6, 7]. Безбалластный путь имеет значительно меньший коэффициент демпфирования по сравнению со щебеночной призмой [5] и, как следствие, большие продольные и сдвиговые напряжения, что является причиной образования дефектов в бетонной плите. На основании проведенных исследований китайские ученые в статье [6] и докладе [7] для высокоскоростного и тяжеловесного движения предпочтение отдали балластному пути.

В настоящей статье проведены расчеты коэффициентов демпфирования щебня и определены их значения для спектральной плотности нагружающей силы, возникающей при взаимодействии колесных пар с верхним и нижним строениями пути. Кроме этого, выбраны материалы в качестве подшпальных демпферов и стабилизаторов границы раздела «щебень — песок», обеспечивающие минимальные напряжения на грунты под железнодорожным полотном и снижающие просадки пути.

Механические процессы в балластной призме. В эксплуатации балластной призмы обычно выделяют три периода эксплуатации [8]. На начальном этапе происходит интенсивная переупаковка, сколы острых граней гранитных зерен и уширение призмы. Экспериментально установлено, что начальная порозность, или, как ее еще называют, максимальная пустотность щебня в насыпном состоянии, составляет $\beta_n = 0,45 - 0,50$, где β_n — доля свободного пространства в насыпном материале. Минимальная порозность щебня может быть достигнута в результате операции уплотнения щебня и составляет $\beta_{min} = 0,33 - 0,34$. По мере эксплуатации пути порозность уменьшается до

$\beta_s = 0,36–0,40$. После переупаковки зерен балласта и уменьшения объема пустот в балластной призме, а также после скола острых граней щебенки наступает основной период нормальной эксплуатации, когда деформации происходят за счет выдавливания щебня в шпальные ящики и за торцы шпал, а также вдавливания зерен щебня в песчаную подушку.

В последнем периоде эксплуатации щебеночно-го балласта из-за округлых форм гранул, засорения порового пространства мелкими частицами щебня, пылевидными частицами перевозимых грузов, песком, нефтепродуктами и сгнившими растительными остатками, резко снижающими структурную вязкость гранулированного материала [1], порозность щебеночной призмы возрастает до значений $0,50–0,65$. Граница «щебень — песок» теряет устойчивость, в результате чего песчаная фракция проникает в поровое пространство щебня, что приводит к еще большему снижению структурной вязкости и ускоряет дальнейшее проникновение песка в поровое пространство щебня. Диссипация энергии продольной волны вибрации вдоль оси Z в сыпучем минеральном материале под шпалой происходит при разрушении кристаллической решетки острых граней и выступов на поверхности щебня и в основном определяется формой гранул, количеством их острых граней, плотностью упаковки и степенью загрязнения, понижающей прочность щебня [1, 4, 5]. Для автодорог все три этапа деградации описаны с помощью аппарата нелинейной динамики или синергетики [9].

Через балластный слой передается давление на основную площадку земляного полотна. Оптимальная толщина балластного слоя определяется его гранулометрическим составом и формой гранул. Напряженное состояние и деформация поверхности балластной подушки и основной площадки земляного полотна зависят от толщины щебеночного слоя, общей толщины балласта вместе с песчаной подушкой, а также от упругопластических свойств шпал [8]. Из-за нарушений постоянства порозности балластного слоя вдоль пути на контакте с балластной подушкой образуются различно напряженные зоны, что приводит к циркуляции частиц песчаной подушки [2, 3] и мелкой фракции щебня. В результате образуются балластные углубления — корыта и ложи. От ширины плеча балластной призмы прямо зависят как сопротивление поперечному сдвигу рельсошпальной решетки, так и стабильность пути в вертикальной плоскости.

В гранулярных материалах большое влияние на порозность оказывает взаимное расположение зерен. Несложные расчеты показывают [4], что в случае наименее плотной кубической укладки зерен щебня порозность будет составлять $\beta_{\max} = 0,48$, а при более плотной гексагональной укладке полишаровых структур (рис. 2) — $\beta_{\max} = 0,34$.

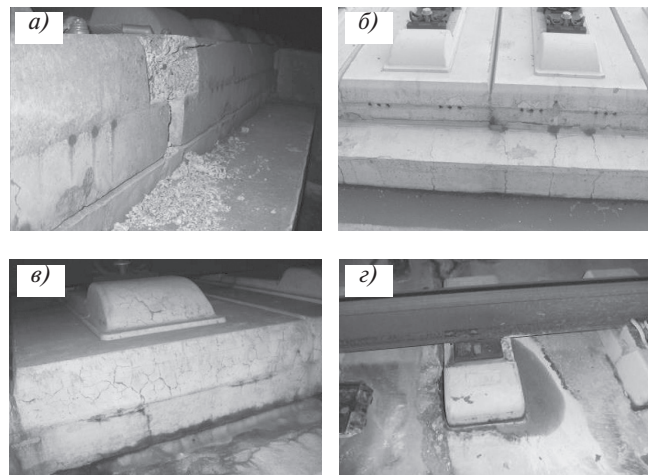


Рис. 1. Деградация бетонной плиты [7]:
а — разрушение боковой поверхности плиты;
б — трещинообразование на несущей плите;
в — вид трещинообразования;
з — разрушение и вымывание несущей плиты
Fig. 1. Degradation of the concrete slab [7]:
а — destruction of the side surface of the plate;
б — cracking on the bearing plate; в — type of cracking;
з — destruction and leaching of the bearing plate

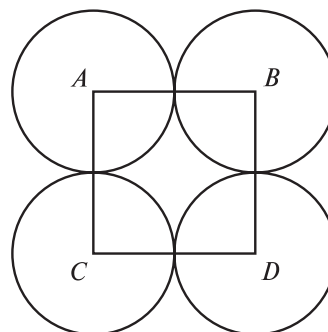


Рис. 2. Свободное расположение шаров в модели фиктивного грунта с гексагональной упаковкой
Fig. 2. Free arrangement of balls in a model of fictitious soil with hexagonal packaging

Количество шаров N , контактирующих с подошвой шпалы, и общая площадь контакта S_k щебня с подошвой шпалы равны

$$N = \left(\frac{b_{\text{ш}}}{d_{\text{ср}}} + 1 \right) \left(\frac{l_{\text{ш}}}{d_{\text{ср}}} + 1 \right) = 474; \quad S_k = \Delta s N, \quad (1)$$

где $d_{\text{ср}}$ — средний размер гранул щебня (45 мм); $b_{\text{ш}}$ — ширина бетонной шпалы (305 мм); $l_{\text{ш}}$ — длина шпалы (2700 мм); Δs — площадь контакта шара с подошвой шпалы. Классическая механика контактных взаимодействий связана прежде всего с именем Генриха Герца, который решил общие случаи сжатия соприкасающихся упругих тел [10]. Если твердый шар вдавливается в упругое полупространство на глубину h ,

образуя область контакта радиусом $a = \sqrt{d_{\text{ср}} h / 2}$, тогда $\Delta s = \pi a^2 = \pi d_{\text{ср}} h / 2$, а необходимая сила для этого имеет следующий вид [10]:

$$\frac{F_{\text{н}}}{N} = \frac{3}{4} E^* \left(\frac{d_{\text{ср}}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} h^{\frac{3}{2}}; \quad \frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_{\text{ш}}^2}{E_{\text{ш}}} + \frac{1 - \nu_{\text{г}}^2}{E_{\text{г}}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{н}}$ — нагрузка на ось (230 кН); E^* — эффективный модуль упругости ($1,98 \cdot 10^{10}$ Па); $E_{\text{ш}}$ — модуль упругости бетона ($2 \cdot 10^{10}$ Па); $\nu_{\text{ш}}$ — коэффициент Пуассона для бетона (0,17); $E_{\text{г}}$ — модуль упругости гранита ($50 \cdot 10^{10}$ Па); $\nu_{\text{г}}$ — коэффициент Пуассона для гранита (0,15).

Из формул (1) и (2) находим глубину вдавливания и площадь контакта:

$$h = \left[\frac{3F_{\text{н}}}{4NE^*} \sqrt{\frac{2}{d_{\text{ср}}}} \right]^{\frac{2}{3}}; \quad (3)$$

$$S_{\text{к}} = \Delta s N = \frac{3^{\frac{2}{3}} \pi d_{\text{ср}}^{\frac{2}{3}} F_{\text{н}}^{\frac{2}{3}} N^{\frac{1}{3}}}{2^{\frac{5}{3}} E^{\frac{2}{3}}} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Отношение площадей контакта полишаровых структур и шпалы равно 0,17 %. Положительные свойства сферических гранул — это способность благодаря структуре рассеивать энергию вибраций на большую площадь. Столь малая площадь контакта $S_{\text{к}}$ приводит к огромным напряжениям и измельчению щебня. Причем мелкая фракция со временем из-за вибрации перемещается в нижнюю часть щебеночного балласта, и поэтому площадь контакта не изменяется. Рассчитанная величина площади контакта лучше согласуется с экспериментально определяемыми значениями напряжений в балластной призме, чем отношение площадей $S_{\text{к}} = 8\%$ [11]. Это различие можно объяснить, если предположить, что на германских железных дорогах используются гранулы пластинчатой формы. Но тогда будет отсутствовать эффект распределения напряжения от шпалы на большую площадь песчаного слоя.

Рост динамического воздействия грузовых составов на земляное полотно способствует интенсивному накоплению остаточных деформаций в нем, и нередко это происходит на линиях, построенных сравнительно недавно [12, 13, с. 34]. Ежегодно железные дороги расходуют значительные средства на ремонт и усиление земляного полотна, однако около 14 % эксплуатационной длины дорог имеет просадки, и в течение многих лет этот показатель не снижается.

Перед тем как перейти к рассмотрению и анализу методов увеличения площади контакта шпалы со щебеночными гранулами, рассмотрим механизм проч-

ности несвязных грунтов. Под действием сжимающих напряжений в грунте, в том числе вызванных его собственным весом, на контактных поверхностях минеральных частиц возникают силы трения и зацепление выступов гранул, препятствующие взаимным перемещениям частиц. В предельном состоянии сдвиг щебня происходит без увеличения сдвигающей нагрузки. Прочность несвязного грунта определяется уровнем действующих в нем сжимающих напряжений. Для оценки прочностных свойств щебня используют уравнение Кулона — Мора

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c; \quad \tau = 0,9 \sigma + 17 \text{ кПа}, \quad (4)$$

где τ — сопротивление сдвигу, Па; σ — нормальное напряжение от шпалы, Па; φ — угол внутреннего трения щебня, определяет его прочность; $\operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент внутреннего трения; c — сцепление сыпучего материала, Па.

Для щебня фракцией 25–65 мм угол внутреннего трения и сцепление сыпучего материала равны соответственно $\varphi = 42^\circ$, $c = 17$ кПа [14]. Фаза выпора является следствием развития фазы сдвигов в области под шпалой с образованием поверхностей скольжения. В результате этого осадки шпалы происходят без увеличения нагрузки за счет перемещения гранул щебеночного слоя по плоскостям скольжения с выходом на поверхность. Изучение поведения сыпучего тела представляет собой сложную задачу, которую обычно заменяют более простой. В ее рамках не рассматриваются деформации, а напряженное состояние принимается таким, какое бывает в начальный момент движения сыпучего тела, когда в каждой его точке возникает сдвиг.

Решение этой сложной задачи приведено во многих источниках [15, 16, 17] и сводится к тому, что сдвиг произойдет только в том случае, если угол естественного откоса сыпучего материала θ достигнет величины угла внутреннего трения φ . При этом площадки скольжения будут иметь определенные углы наклона к линиям действия главных напряжений. Для песчаной подушки используется тот же подход, что и для щебня, но для песка [14] $\varphi = 42^\circ$, $c = 5$ кПа, $\nu = 0,25$. Прочностные свойства минеральных материалов — щебня и песка — не зависят от окружающей температуры вплоть до 500°C и влажности, но постепенно деградируют при засорении их порового пространства мелкой фракцией, нефтепродуктами и растительными остатками [1]. Повышенная влажность в весенне-осенний период значительно усиливает деградацию прочности балластной призмы при наличии в ней засорителей [1].

Полимерные материалы, используемые в конструкции железнодорожного пути для демпфирования динамических нагрузок, при воздействии на них

значительных напряжений разрушаются. К основным условиям эксплуатации, влияющим на работоспособность полимерных изделий, относятся температура окружающей среды, ее влажность, наличие внешнего химически агрессивного воздействия и поля напряжений [18]. Тепловое поведение полимерных материалов является их важнейшей характеристикой, определяющей выбор и эффективное использование. Причина этого заключается в цепном макромолекулярном строении полимеров. Чем подвижнее кинетические фрагменты макромолекул, тем рельефнее их реакция на интенсивность теплового поля. Чем ниже физико-механические свойства полимера, тем он чувствительнее к изменениям температуры. Так, среди полиолефинов полипропилен, прочность и жесткость которого позволяет отнести его к конструкционным материалам, при нагреве до 80 °С теряет около 25 % стандартной прочности при изгибе, в то время как полиэтилен высокой плотности уже при 60 °С сохраняет лишь половину исходной прочности. Сходные соотношения наблюдаются для полиолефинов при их испытаниях на растяжение и изгиб. Необходимо учитывать, что на получаемые результаты существенно влияет наличие или отсутствие надреза на полимерных изделиях. Образцы без надрезов имеют значительно меньшую тепловую зависимость, чем образцы с надрезами (концентраторами напряжений) [18, 19]. Поэтому полусферические выемки и цилиндрические вырезы в центральных областях прокладок с целью снижения их износа в периферических областях приводят к существенному снижению температурного диапазона эффективной работы этих изделий.

Чаще всего в качестве демпферов динамических грузов на железнодорожных линиях используют дешевые композиции на основе органических веществ: синтетические смолы, полимеры, латексы, лигносульфонаты, битумы. Результаты научных исследований органических полимерных составов, физико-механические свойства и опыт промышленного использования водоизоляционных композиций представлены во многих работах специалистов нефтяной промышленности [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. Основой для гелеобразующего состава являются высокомолекулярные соединения, в частности нефти и синтетические смолы, полимеры, олигомеры, мономеры. Добавление в исходные полимерные составы вспомогательных реагентов позволяет регулировать и контролировать физико-химические и эксплуатационные свойства водоизоляционных композиций. На сегодняшний день основную часть (99 %) используемых полимеров, применяемых в методах увеличения нефтеотдачи, составляют гидролизованные полимеры амида акриловой кислоты [21]. Допустимые напряжения сдвига для таких полимеров равны 0,6–10 МПа [20].

Шпала при наезде колес тележки вагона на ее край испытывает кручение, и в верхнем слое щебня вначале генерируется поверхностная вибрационная волна, которая затем переходит в вертикальную. Поэтому эксплуатация полимера связана с постоянным деформированием и разрушением его поверхностных слоев.

Молекулы полимера заполняют не только поровое пространство, но и проникают в контактную область гранул, уменьшают трение и снижают угол внутреннего трения щебня и показатель сцепления сыпучего материала. Средние контактные напряжения в верхних слоях щебеночного слоя достигают до 1500 МПа, в нижних слоях — до 700 МПа из-за неравномерной опоры шпал на щебеночный балласт [8]. Столь значительные напряжения вызывают сдвиговые деформации в узком приповерхностном слое, способные полностью разрушить адгезионные контакты полимера, особенно в области контакта гранул. Многократное повторение данного процесса также приводит к нарастанию механических гистерезисных потерь, вызывающих появление трения и износа полимера, контактирующего с гранулами. Допустимые касательные напряжения полимеров, приведенные выше и вызывающие сдвиг, значительно ниже напряжений, наблюдающихся в щебеночной призме. Можно сделать вывод, что не следует ожидать длительного срока службы при использовании полимерного материала для упрочнения балластного слоя [30].

Распространение сильных вибрационных волн в неоднородных сыпучих средах. Воздействия сильных вибрационных волн на сыпучие и полимерные материалы от проходящих грузовых поездов систематически не изучались. Только две экспериментальные работы [31, 32], касающиеся изучения воздействия сильных продольных волн на сыпучий материал, были найдены нами. При воздействии на сыпучий материал за счет энергии основной волны и трения гранул друг о друга генерируется широкополосный спектр вторичных гармоник [31, 32]. Это приводит к увеличению коэффициента поглощения и уменьшению амплитуды основной деформационной волны. В экспериментах, проведенных В.А. Куликовым (ИГФ СО РАН) по измерению показателей поглощения сильных продольных волн в разных материалах, наблюдалась существенная нелинейность поведения продольных волн: распывание и амплитудно-зависимое затухание, пропорциональное первой степени частоты [31]. Как указывает автор [30], это и есть переходный процесс от одного закона взаимодействия частиц (модифицированного закона Герца), характеризующегося малыми деформациями и «сухим» трением, к другому закону, который характеризуется сверхмалыми деформациями на уровне атомного размера и большей скоростью распространения. По мнению автора

настоящей статьи, к двум механизмам распространения вибрационных импульсов в гранулированных материалах [31, 32] следует добавить еще один: переход гранулированного материала в упруговязкопластическое или флюидонасыщенное состояние за счет измельчения острых выступов гранул и их дробления, заполнения порового пространства пылеватыми частицами, водой и нефтепродуктами [1]. Это, в свою очередь, приводит к дополнительному перекачиванию энергии в область сверхнизких частот, пропорциональному первой степени частоты, и существенному увеличению поглощения, особенно высокочастотных гармоник [5, 31]. Экспериментальные данные для нового крупного щебня [31] свидетельствуют о том, что гармоники с частотой более 100 Гц слабо поглощаются в слое щебня из-за большой массы его гранул.

В [33] показано, что зернистые среды обладают сильными нелинейными свойствами, основной причиной которых являются микротрещины, границы и области контакта гранул и физико-механические свойства веществ, заполняющих поровое пространство щебеночного слоя. Скорость уединенной сдвиговой волны при наличии межзерновой водяной пленки толщиной 10^{-7} м уменьшается в 20–60 раз по сравнению со случаем «сухих» контактов гранул, для которого скорость волны равна $2 \cdot 10^3$ м/с [33]. Основной причиной этого является вязкость вещества зерновой прослойки. При вариации вязкости от 10^{-3} (воды) до 10^2 Па·с скорость волны понижается на три порядка. Величина скорости волны v_b и вязкость вещества прослойки η связаны соотношением $v_b \sim \sqrt{\eta}$ [33]. Коэффициент поглощения энергии в зернистой среде прямо пропорционален вязкости полимерной прослойки между гранулами.

Таким образом, заполнение порового пространства щебеночного слоя песком и вязкопластической средой (полимерами, органическими вяжущими и материалами на их основе, твердой полиуретановой пеной, водой или нефтепродуктами) приводит к снижению прочности щебеночной призмы. Повышение температуры окружающей среды, особенно выше 30°C , снижает упругие свойства и структурную вязкость вязкопластических материалов, заполняющих поровое пространство щебеночной призмы, уменьшая в результате ее прочность. Но при этом резко возрастает коэффициент поглощения энергии вибрации в широком частотном диапазоне и снижаются динамические нагрузки на рельсовую колею в плане.

Закключение. 1. Прочностные свойства минеральных материалов — щебня и песка — не зависят от окружающей температуры вплоть до 500°C и влажности, но постепенно деградируют при засорении их порового пространства мелкой фракцией, нефтепродуктами и растительными остатками.

2. Коэффициент поглощения энергии в зернистой среде прямо пропорционален вязкости полимерной прослойки между гранулами.

3. Полимерные материалы, используемые в конструкции железнодорожного пути для демпфирования динамических нагрузок, при воздействии на них значительных напряжений постепенно разрушаются. К основным условиям эксплуатации, определяющим работоспособность полимерных изделий, относятся температура окружающей среды, ее влажность, наличие внешнего химически агрессивного воздействия и поля напряжений. Наличие надразов или царапин — концентраторов напряжений на полимерных изделиях, используемых в качестве демпферов, существенно изменяет тепловую зависимость. Поэтому полусферические выемки, ребристые и цилиндрические вырезы в центральных областях прокладок с целью снижения их износа в периферических областях приводят к значительному сужению температурного диапазона эффективной работы этих изделий.

4. Чаще всего в качестве демпферов динамических нагрузок на железнодорожных линиях используют дешевые композиции на основе органических веществ, которыми пропитывают щебень: синтетические смолы, полимеры амида акриловой кислоты, латексы, лигносульфонаты, битумы, пенополиуретан.

5. При заполнении порового пространства щебня возникает адгезионное взаимодействие между молекулами полимера и поверхностями гранул. Молекулы полимера не только заполняют поровое пространство, но и проникают в контактную область гранул, уменьшают трение и снижают угол внутреннего трения щебня и показатель сцепления сыпучего материала. Многократное повторение деформационного процесса приводит к нарастанию механических гистерезисных потерь, вызывающих появление трения и износа полимера, контактирующего с гранулами. Эксплуатация железных дорог приводит к необратимой деформации и разрушениям поверхностных слоев полимера.

6. Повышение температуры окружающей среды, особенно выше 30°C , снижает упругие свойства и структурную вязкость вязкопластических материалов, заполняющих поровое пространство щебеночной призмы, уменьшая в результате ее прочность. Поэтому ожидаемый срок службы щебеночного балласта при его пропитке полимерным материалом не превышает пяти лет, кроме того, могут потребоваться значительные внеплановые расходы на ремонт пути и очистку гранул отработанного балласта от органического вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельков В. М., Антипов Б. В. Физико-химические основы устойчивости пути // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 12. С. 21–24.

2. Бельков В. М. Моделирование упруговязкопластических свойств земляного полотна. Постановка задачи 1 // Вестник ВНИИЖТ. 2016. Т. 75. № 6. С. 334–338. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-6-334-338>.
3. Бельков В. М. Моделирование упруговязкопластических свойств земляного полотна. Постановка задачи 2 // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 1. С. 61–64. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-61-64>.
4. Бельков В. М. Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 1 // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 3. С. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-187-192>.
5. Бельков В. М. Моделирование вибродемпфирующих свойств упруговязкопластических слоев земляного полотна. Постановка задачи 2 // Вестник ВНИИЖТ. 2017. Т. 76. № 5. С. 312–320. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-312-320>.
6. Jing G., Lie G., Lin J., Martinez J., Yin C. Aerodynamic characteristics of individual ballast particle by wind tunnel tests // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2014. No. 7 (2). P. 137–142.
7. Jing G., Zhou Y., Lin J., Zhang J. Ballast flying mechanism and sensitivity factors analysis // International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. 2012. No. 5 (4). P. 928–939.
8. Тема № 9 «Балластный слой». Назначение и требования, предъявляемые к балластному слою [Электронный ресурс] / Иркутский гос. ун-т путей сообщения. URL: <https://studfiles.net/preview/6283013/> (дата обращения: 22.03.2018 г.).
9. Кириллов А. М., Завьялов М. А. Синергетический подход к моделированию физического износа инженерно-технических систем // Вестник МГСУ. 2015. № 5. С. 93–102.
10. Лукьянова А. Н. Моделирование контактного взаимодействия деталей: учеб. пособие. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2012. 87 с.
11. Эффективные подрельсовые и напильные прокладки из материалов SYLOMER и SYLODYN [Электронный ресурс] / ООО «Акустические Материалы и Технологии» (Киев). URL: <http://www.acoustic.ua/articles/113> (дата обращения: 22.03.2018 г.).
12. Селицкая Н. В., Лашин М. В., Яковлев Д. Н. Усиление балластной призмы органическими вяжущими и материалами на их основе // Новые задачи технических наук и пути их решения: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Челябинск, 10 дек. 2015 г.) / отв. ред. А. А. Сукиасян. Уфа: АЭТЕРНА, 2015. Т. 2. С. 118–121.
13. Полевиченко А. Г. Деформации земляного полотна, меры предупреждения и способы ликвидации. Хабаровск: ДВГУПС, 1999. 29 с.
14. Колос А. Ф., Турсунов Х. И., Николайтис Д. С. Исследование прочностных свойств балластного материала, засоренными барханными песками [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона: электрон. науч. журнал. 2013. № 1. URL: <http://www.ivdon.ru/rn/magazine/archive/n1y2013/1423> (дата обращения: 04.02.2018 г.).
15. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений: учеб. для гидротехн. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1991. 447 с.
16. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел. М.: Стройиздат, 1977. 256 с.
17. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.: Стройиздат, 1990. 304 с.
18. Яковлев С. Н. Расчет полиуретановых деталей, работающих на сжатие при статической нагрузке // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Машиностроение. 2014. Вып. 1 (190). С. 137–142.
19. Полимерные материалы: влияние условий эксплуатации на прочность полимеров [Электронный ресурс] // Plastinfo: [сайт]. URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/112/> (дата обращения: 23.03.2018 г.).
20. Раупов И. Р. Технология внутрипластовой водоизоляции терригенных коллекторов с применением полимерных составов и оптического метода контроля за процессом: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.17. СПб., 2016. 143 с.
21. Исмагилов Т. А. Современные физико-химические технологии повышения нефтеотдачи трудноизвлекаемых запасов: лекция по программе профессиональной переподготовки «Геотехнологии добычи нефти и газа». Альметьевск, 2015. 216 с.
22. Применение коллоидных систем для увеличения нефтеотдачи пластов / О. Ю. Сладовская [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 10. С. 585–591.
23. Промышленное внедрение собственных технологий увеличения нефтеотдачи пластов ОАО «Татнефть» на месторождениях Татарстана / З. М. Ганеева [и др.] // Нефть. Газ. Новации. 2014. № 10. С. 30–33.
24. Телин А. Г. Повышение эффективности воздействия на пласт сшитыми полимерными системами за счет оптимизации их фильтрационных и реологических параметров // Интервал. 2002. № 12 (47). С. 8–9.
25. Алтунина Л. К. Гелеобразующие и нефтewытесняющие композиции для увеличения нефтеотдачи залежей высоковязких нефтей // Нефтепромысловая химия: материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. (Москва, 23–24 июня 2011 г.). М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2011. С. 34–37.
26. Разработка реагента для селективной водоизоляции на основе наноразмерного радиационносшитого полиакриламида / С. А. Шувалов [и др.] // Башкирский химический журнал. 2012. Т. 19. № 4. С. 148–153.
27. Шувалов С. А., Винокуров В. А., Хлебников В. Н. Применение полимерных реагентов для увеличения нефтеотдачи пласта и водоизоляции // Труды РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2013. № 4 (273). С. 98–104.
28. Кондрашев А. О., Рогачев М. К., Кондрашев О. Ф. Водоизоляционный полимерный состав для низкопроницаемых коллекторов // Нефтяное хозяйство. 2014. № 4. С. 63–65.
29. Раупов И. Р., Кондрашева Н. К., Бурханов Р. Н. Разработка полимерного состава для внутрипластовой водоизоляции // Нефтегазовый комплекс: образование, наука и производство: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Альметьевск, 30 марта — 3 апр. 2015 г.). Альметьевск: Альметьевский гос. нефтяной ин-т, 2015. Ч. 1. С. 144–147.
30. Бельков В. М. Демпфирование динамических сил материалами, применяемыми при строительстве балластного и безбалластного пути. Полимерные прокладки // Вестник ВНИИЖТ. 2018. Т. 77. № 5. С. 310–320. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-310-320>.
31. Куликов В. А., Сибиряков Е. Е. Распространение сильных волн в неоднородных сыпучих средах // Динамика сплошной среды. Акустика неоднородных сред. Новосибирск: ИГИЛ СО РАН, 2003. Вып. 121. С. 103–110.
32. Сибиряков Е. Б. Зависимость между коэффициентом Пуассона и микроструктурой микронеднородной среды // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 1. С. 63–68.
33. Быков В. Г. Уединенные сдвиговые волны в зернистой среде // Акустический журнал. 1999. Т. 45. № 2. С. 169–173.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛЬКОВ Владимир Максимович,

д-р физ.-мат. наук, научный консультант НКЦ, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 04.04.2018 г., актуализирована 29.10.2018 г., принята к публикации 27.12.2018 г.

Damping of dynamic forces by materials used in the construction of ballast and ballastless railway tracks. Crushed stone

V. M. BEL'KOV

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. Strength properties of mineral materials used in the track operation, which are crushed stone and sand, do not depend on the ambient temperature (up to 500 °C) and humidity, but gradually degrade when its pore space becomes clogged with fines, oil products and plant residues. Polymeric materials used in the construction of railway tracks for damping dynamic loads, when exposed to significant stresses, are gradually destroyed. The main operating conditions that determine the performance of polymer products include the ambient temperature, its humidity, the presence of a chemically aggressive external effect and a stress fields. Cuts or scratches — stress concentrators on polymer products — significantly change the thermal dependence of its mechanical properties. Therefore, hemispherical grooves, cylindrical cuts in the central areas of pads, made to reduce wear in the peripheral areas, lead to a significant narrowing of the temperature range of the effective operation of these products. Granular media have strong non-linear properties, the main causes of which are microcracks, boundaries and areas of contact of the granules as well as physic-mechanical properties of substances that fill the pore space of crushed stone layer. Coefficient of energy absorption in a granular medium is directly proportional to the viscosity of the polymer layer between the granules. Filling the pore space of the crushed stone layer with sand and viscous-plastic medium (polymers, organic binders and materials based on them, solid polyurethane foam, water or oil products) leads to decrease in the strength of crushed stone prism. An increase in the ambient temperature, especially above 30 °C, reduces the elastic properties and structural viscosity of viscous-plastic materials that fill the pore space of a crushed stone prism, thereby reducing its strength. But at the same time, the energy absorption coefficient of vibration in a wide frequency range sharply increases and the dynamic loads on the track gauge profile are decreased. Most often, cheap organic-based compositions are used as dynamic load absorbers in the crushed stone layer: synthetic resins, acrylic acid amide polymers, latexes, lignin sulfonates and bitumen. When filling the pore space of crushed stone, an adhesive interaction occurs between the polymer molecules and the surfaces of the granules. Polymer molecules fill not only the pore space, but also penetrate into the contact area of the granules, reduce friction and decrease the angle of internal friction of crushed stone and the adhesion index of the bulk material. However the operation of railways is associated with permanent deformation and destruction of the surface layers of the polymer. Multiple repetition of the deformation process leads to an increase in mechanical hysteresis losses, causing friction and wear of the polymer in contact with the granules. Therefore, one should not expect a long service life when using a polymeric material for hardening the ballast layer.

Keywords: elastic viscous-plastic properties of materials; damping; vertical vibration waves; layered materials; crushed stone

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-2-114-121>

REFERENCES

1. Bel'kov V. M., Antipov B. V. *Fiziko-khimicheskie osnovy us-toyichivosti puti* [Physic and chemical basis of track sustainability]. Put' i putevoe khozyaystvo [Railway Track and Facilities], 2013, no. 12, pp. 21–24.
2. Bel'kov V. M. *Modelirovanie uprugovyazkoplasticheskikh svoystv zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 1* [Modelling of elastoviscoplastic properties of the subgrade. Problem statement 1]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2016, Vol. 75, no. 6, pp. 334–338. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-6-334-338>.
3. Bel'kov V. M. *Modelirovanie uprugovyazkoplasticheskikh svoystv zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 2* [Modelling of elastoviscoplastic properties of the subgrade. Problem statement 2]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 1, pp. 61–64. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-1-61-64>.
4. Bel'kov V. M. *Modelirovanie vibrodempfiruyushchikh svoystv uprugovyazkoplasticheskikh sloev zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 1* [Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 1]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 3, pp. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-3-187-192>.
5. Bel'kov V. M. *Modelirovanie vibrodempfiruyushchikh svoystv uprugovyazkoplasticheskikh sloev zemlyanogo polotna. Postanovka zadachi 2* [Modelling of vibration-damping properties of elastic-viscoplastic layers of the roadbed. Problem statement 2]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2017, Vol. 76, no. 5, pp. 312–320. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-5-312-320>.
6. Jing G., Lie G., Lin J., Martinez J., Yin C. *Aerodynamic characteristics of individual ballast particle by wind tunnel tests*. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2014, no. 7 (2), pp. 137–142.
7. Jing G., Zhou Y., Lin J., Zhang J. *Ballast flying mechanism and sensitivity factors analysis*. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2012, no. 5 (4), pp. 928–939.
8. Theme no. 9. *Ballast. Purpose and requirements for the ballast layer*. Irkutsk State University of Railways. URL: <https://studfiles.net/preview/6283013> (retrieved on 22.03.2018) (in Russ.).
9. Kirillov A. M., Zav'yalov M. A. *Sinergeticheskiy podkhod k modelirovaniyu fizicheskogo iznosa inzhenerno-tekhnicheskikh sistem* [Synergetic approach to modeling the physical wear of engineering systems]. Vestnik MGSU, 2015, no. 5, pp. 93–102.
10. Luk'yanova A. N. *Modelirovanie kontaktnogo vzaimodeystviya detaley. Ucheb. posobie* [Modeling contact interaction details. Tutorial]. Samara, Samara State Technical University Publ., 2012, 87 p.
11. *Effective sub-rail and sleeper pads made of SYLOMER and SYLODYN materials*. LLC Acoustic Materials and Technologies (Kiev). URL: <http://www.acoustic.ua/articles/113> (retrieved on 22.03.2018) (in Russ.).
12. Selitskaya N. V., Lashin M. V., Yakovlev D. N. *Usilenie ballastnoy prizmy organicheskimi vyazhushchimi i materialami na ikh osnove* [Strengthening the ballast prism with organic binders and materials based on them]. Novye zadachi tekhnicheskikh nauk i puti ikh resheniya. Sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Chelyabinsk, 10 dek. 2015 g.) [New problems of technical sciences and their solutions. Coll. of articles of the International scientific and practical conference (Chelyabinsk, December 10, 2015)]. Ufa, AETERNA Publ., 2015, no. 2, pp. 118–121.

13. Polevichenko A. G. *Deformatsii zemlyanogo polotna, mery preduprezhdeniya i sposoby likvidatsii* [Deformations of the roadbed, preventive measures and methods of elimination]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 1999, 29 p.
14. Kolos A. F., Tursunov Kh. I., Nikolaytist D. S. *Study of the strength properties of ballast material clogged with sand dunes*. Engineering Bulletin of the Don, 2013, no. 1. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1423> (retrieved on 04.02.2018) (in Russ.).
15. Ivanov P. L. *Grunt i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Ucheb. dlya gidrotekhn. spets. vuzov* [Soils and foundations of hydraulic structures. Reference book for special hydraulic engineering universities]. Moscow, Higher School Publ., 1991, 447 p.
16. Kleyn G. K. *Stroitel'naya mekhanika sypuchikh tel* [Building mechanics of bulk bodies]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1977, 256 p.
17. Sokolovskiy V. V. *Statika sypuchey sredy*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1990, 304 p.
18. Yakovlev S. N. *Raschet poliuretanovykh detaley, rabotayushchikh na szhatie pri staticheskoy nagruzke* [Calculation of polyurethane parts working in compression under static load]. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroyeniye, 2014, no. 1 (190), pp. 137–142.
19. *Polymer materials: the influence of operating conditions on the strength of polymers*. Plastinfo. URL: <https://plastinfo.ru/information/articles/112/> (retrieved on 23.03.2018) (in Russ.).
20. Raupov I. R. *Tekhnologiya vnutriplastovoy vodoizolyatsii terrigennykh kollektorov s primeneniem polimernykh sostavov i opticheskogo metoda kontrolya za protsessom. Kand. tekhn. nauk diss.* [Technology of in-situ water insulation of terrigenous reservoirs using polymer compositions and optical method of process control. Cand. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2016, 143 p.
21. Ismagilov T. A. *Sovremennye fiziko-khimicheskie tekhnologii povysheniya nefteotdachi trudnoizvlekaemykh zasobov. lektsiya po programme professional'noy perepodgotovki "Geotekhnologii dobychi nefiti i gaza"* [Modern physical and chemical technologies for enhancing oil recovery of hard-to-recover reserves. Lecture on the professional retraining program "Geotechnologies for oil and gas production"]. Almet'yevsk, 2015, 216 p.
22. Sladovskaya O. Yu., Bashkirtseva N. Yu., Kuryashov D. A., Lakhova A. I. *Primenenie kolloidnykh sistem dlya uvelicheniya nefteotdachi plastov* [The use of colloidal systems for enhanced oil recovery]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2010, no. 10, pp. 585–591.
23. Ganeeva Z. M. *Promyshlennoe vnedrenie sobstvennykh tekhnologiy uvelicheniya nefteotdachi plastov OAO "Tatneft" na mestorozhdeniyakh Tatarstana* [Industrial implementation of in-house enhanced oil recovery technologies of JSC "TATNEFT" in the fields of Tatarstan]. Neft'. Gaz. Novatsii [Oil. Gas. Novation], 2014, no. 10, pp. 30–33.
24. Telin A. G. *Povyshenie effektivnosti vozdeystviya na plast sshitimi polimernymi sistemami za schet optimizatsii ikh fil'tratsionnykh i reologicheskikh parametrov* [Improving the effectiveness of the impact on the reservoir cross-linked polymer systems by optimizing their filtration and rheological parameters]. Interval, 2002, no. 12 (47), pp. 8–9.
25. Altunina L. K. *Geleobrazuyushchie i neftevytesnyayushchie kompozitsii dlya uvelicheniya nefteotdachi zalezhey vysokovyazkikh neftey* [Gelling and oil-displacing compositions for enhanced oil recovery of highly viscous oil deposits]. Neftepromyslovaya khimiya. Materialy VI Vseros.nauch.-prakt. konf. (Moskva, 23–24 iyunya 2011 g.) [Oilfield chemistry. Proc. of the VI-th All-Russian scientific-practical conference (Moscow, June 23–24, 2011)]. Moscow, RGU nefiti i gaza im. I. M. Gubkina [Russian State University of Oil and Gas n.a. I. M. Gubkin] Publ., 2011, pp. 34–37.
26. Shuvalov S. A., Ziangirova M. Yu., Bardin M. A. *Razrabotka reagenta dlya selektivnoy vodoizolyatsii na osnove nanorazmernogo radiatsionnosshitogo poliakrilamida* [Development of a reagent for selective waterproofing based on nanoscale radiation crosslinked polyacrylamide]. Bashkirskiy khimicheskii zhurnal [Bashkir Chemical Journal], 2012, Vol. 19, no. 4, pp. 148–153.
27. Shuvalov S. A., Vinokurov V. A., Khlebnikov V. N. *Primenenie polimernykh reagentov dlya uvelicheniya nefteotdachi plasta i vodoizolyatsii* [The use of polymer reagents for enhanced oil recovery and water insulation]. Trudy RGU nefiti i gaza im. I. M. Gubkina [Proceedings of the RSU of Oil and Gas n.a. I. M. Gubkin], 2013, no. 4 (273), pp. 98–104.
28. Kondrashev A. O., Rogachev M. K., Kondrashev O. F. *Vodoizolyatsionnyy polimernyy sostav dlya nizkopronitsaemykh kollektorov* [Water-insulating polymer composition for low-permeable reservoirs]. Neftyanoe khozaystvo, 2014, no. 4, pp. 63–65.
29. Raupov I. R., Kondrasheva N. K., Burkhanov R. N. *Razrabotka polimernogo sostava dlya vnutriplastovoy vodoizolyatsii* [Development of polymer composition for intra-layer waterproofing]. Neftegazovyy kompleks: obrazovanie, nauka i proizvodstvo. Materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. (Al'met'evsk, 30 marta — 3 apr. 2015 g.) [Oil and gas complex: education, science and production. Materials of the All-Russian scientific-practical conference (Almet'yevsk, March 30 – April 3, 2015)]. Almet'yevsk, Almet'yevsk State Oil Institute Publ., 2015, Part 1, pp. 144–147.
30. Bel'kov V. M. *Dempfirovaniye dinamicheskikh sil materialami, primenyaemymi pri stroitel'stve ballastnogo i bezballastnogo puti. Polimernye prokladki* [Damping of dynamic forces by materials used in the construction of ballast and ballastless tracks. Polymer pads]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 2018, Vol. 77, no. 5, pp. 310–320. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-5-310-320>.
31. Kulikov V. A., Sibiryakov E. E. *Rasprostraneniye sil'nykh voln v neodnorodnykh sypuchikh sredakh* [Propagation of strong waves in inhomogeneous granular media]. Dinamika sploshnoy sredy. Akustika neodnorodnykh sred [Continuum dynamics. Acoustics of heterogeneous environments]. Novosibirsk, IGIL SO RAN Publ., 2003, no. 121, pp. 103–110.
32. Sibiryakov E. B. *Zavisimost' mezhdru koeffitsientom Puasona i mikrostrukturay mikroneodnorodnoy sredy* [Relationship between the Poisson's ratio and the microstructure of a micro-inhomogeneous medium]. Fizicheskaya mezomekhanika [Physical mesomechanics], 2004, Vol. 7, no. 1, pp. 63–68.
33. Bykov V. G. *Uedinennyye sdvigovyye volny v zernistoy srede* [Solitary shear waves in a granular medium]. Akusticheskiy Zhurnal, 1999, Vol. 45, no. 2, pp. 169–173.

ABOUT THE AUTHOR

Vladimir M. BEL'KOV,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Scientific Consultant, Science and consultancy center (NKTs), JSC "VNIIZhT"

Received 04.04.2018

Revised 29.10.2018

Accepted 27.12.2018

■ E-mail: belkov.vladimir@vniizht.ru (V. M. Bel'kov)