

УДК 625.141.1

Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути

А. Ф. Колос

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Колос А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 3. — С. 558–575. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575

Аннотация

Цель: Определение закономерностей засорения и загрязнения щебеночного балласта, воспринимающего вибродинамическую нагрузку от подвижного состава, а также его срока службы. **Методы:** В работе использованы теоретические и эмпирические методы исследования. Теоретические методы основаны на анализе известных моделей, описывающих процессы деградации щебня при эксплуатации железнодорожного пути, а эмпирические — на основе проведенных экспериментов и испытаний. Выявление закономерностей накопления в щебеночном балласте загрязнителей и засорителей базировалось на результатах динамических стендовых испытаний и лабораторного определения зернового состава щебня, изъятых из балластной призмы эксплуатируемого железнодорожного пути с разной наработкой тоннажа. В работе использованы методы статистической обработки результатов испытаний и регрессионного анализа. **Результаты:** По данным статистической обработки результатов испытаний и лабораторных определений зернового состава щебня установлены функциональные зависимости накопления в щебеночном балласте продуктов собственного дробления, абразивного износа, а также внешнего загрязнения в зависимости от исходных физико-механических свойств щебня, условий эксплуатации железнодорожного пути и системы его технического обслуживания. В работе разработана математическая модель прогнозирования срока службы щебеночного балласта в зависимости от условий эксплуатации участка железнодорожного пути. **Практическая значимость:** Результаты исследования позволяют прогнозировать срок службы щебеночного балласта из условия его предельно допустимого загрязнения и засорения, а также обоснованно планировать работы по техническому обслуживанию железнодорожного пути.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, щебеночный балласт, балластная призма, засорение щебеночного балласта, загрязнение щебеночного балласта, срок службы щебеночного балласта.

Введение

Основной задачей технического обслуживания железнодорожного пути является рациональное определение видов и сроков выполнения путевых работ по устранению и предупреждению появления отступлений от норм содержания рельсовой колеи. Появление отступлений III и IV степени [1] от норм содержания пути, которые требуют либо ограничения скоростей движения поездов, либо вообще закрытия пути и проведения неотложных работ, связано в том числе с состоянием балластного слоя, которое зависит от его несущей способности и степени деформативности. И несущая способность, и деформативность определяются физико-механическими свойствами применяемого в конструкции пути щебеночного балласта, и если изначальные свойства щебня при укладке в путь, как правило, удовлетворяют требованиям стандарта [2], то эти же свойства после определенной наработки тоннажа могут существенно ухудшиться по ряду причин.

Изменение свойств щебеночного балласта в процессе эксплуатации железнодорожного пути будем называть «износом (деградацией) щебеночного балласта» и связывать в том числе с процессами его засорения и загрязнения, а также снижением под действием этих факторов его механических свойств. Загрязнение и засорение щебеночного балласта, как известно [3–7], возникает как за счет внутренних, так и за счет внешних засорителей и загрязнителей. Внутренние — образуются в результате дробления и истирания зерен щебня [8] в процессе его работы в пути под поездной вибродинамической нагрузкой, а также при уплотнении пути подбивкой [9], т. е. в щебеночном балласте образуются продукты собственного дробления и истирания. Внешние — появляются в балластном материале в результате засорения щебня частицами перевозимых грузов, пылью, приносимой ветром и водой [7, 10–12].

Под засорением [10] щебеночного балласта понимается появление в его зерновом составе частиц размером 0,1–25 мм — для щебня II категории; 0,1–30 мм — для щебня I категории и 0,1–22,4 мм — для щебня категории «В» по ГОСТ 7392 [2]. Под загрязнением [10] — появление в зерновом составе щебня пылеватых и глинистых фракций с размером частиц менее 0,1 мм за счет истирания под действием поездной вибродинамической нагрузки его зерен (абразивного износа частиц), а также за счет внешнего загрязнения перевозимыми сыпучими грузами (уголь, песок, руда и т. д.), песком из песочниц локомотивов, а также за счет инфильтрации глинистых и пылеватых частиц из слоев земляного полотна, непосредственно подстилающих балластную призму (при отсутствии разделительного слоя). И засорение, и загрязнение щебеночного балласта в совокупности прежде всего приводят к снижению его фильтрационных свойств.

Указанные выше процессы приводят к снижению следующих механических свойств щебня: сопротивления истираемости и удару, удельного зацепления, угла внутреннего трения, модулей упругости и деформации [3, 10]. При этом под воздействием подвижного состава в балластной призме возникает напряженное состояние, приводящее при уменьшении механических свойств щебня к повышенным упругим и остаточным деформациям пути. Последние постепенно накапливаются в балластной призме и с течением времени обуславливают появление отклонений рельсовых нитей по уровню, возникновение просадок, толчков и перекосов [5].

Анализ проведенных исследований [7, 10, 12] показывает, что в течение межремонтного цикла работа балластного слоя железнодорожного пути характеризуется четырьмя периодами, при этом каждый период характеризуется различной интенсивностью накопления остаточных деформаций пути. Такое различие напрямую связано

с несущей способностью и деформативностью балластной призмы, которые напрямую зависят от степени износа балласта.

В течение I периода происходят доуплотнение щебня, его упрочнение и, следовательно, увеличение несущей способности и снижение деформативности балластного слоя. В течение всего II периода работа балластного слоя под поездной нагрузкой характеризуется значительной несущей способностью и невысокой деформативностью из-за отсутствия критического износа щебня — балластный слой слабо изменяет свои изначальные геометрические очертания, остаточные деформации накапливаются с незначительной интенсивностью и являются практически равномерными по длине, особо не влияя на эксплуатацию железнодорожного пути. III и IV периоды работы балластного слоя характеризуются засоренностью и загрязненностью щебня, сопровождающимися ростом его влажности и, соответственно, появлением выплесков, а также снижением сопротивления истираемости и удару, морозостойкости, формированием зерен щебня более округлой сглаженной формы за счет абразивного износа частиц [10]. Вследствие указанных обстоятельств происходит снижение прочностных свойств щебеночного балласта как сыпучего материала, снижение показателей деформируемости и, следовательно, уменьшение его несущей способности и интенсивное накопление остаточных деформаций пути.

В силу отмеченного можно констатировать, что износ щебеночного балласта, приводящий к ухудшению его физико-механических свойств в процессе его работы под поездной нагрузкой и под воздействием других внешних факторов, прежде всего связан с его засорением и загрязнением и будет приводить к росту количества расстройств и неисправностей рельсовой колеи, выявляемых в ходе эксплуатации. Однако до настоящего времени остаются до конца не исследованными про-

цессы накопления в балласте внешних и внутренних засорителей и загрязнителей в зависимости от наработки тоннажа и исходных физико-механических свойств щебеночного балласта.

Методы испытаний, применяемое оборудование и приборы

Исследование процессов деградации щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути осуществлялось путем определения зернового состава щебня различных горных пород, изъятого из балластной призмы железнодорожного пути с известной наработкой тоннажа, а также в ходе стендовых динамических испытаний, при которых моделировалось воздействие подвижного состава на балластный слой.

Для проведения стендовых испытаний использована сервогидравлическая испытательная машина INSTRON 8802, которая позволяет смоделировать циклическое воздействие подвижного состава на щебеночный балласт. Схема установки представлена на рис. 1.

Машина характеризуется следующими основными параметрами: испытательной нагрузкой до 250 кН в циклическом и статическом режиме; скоростью нагружения до 10 кН/с; частотой приложения нагрузки до 10 Гц; погрешностью измерения нагрузки $\pm 0,5\%$ от измеряемой величины в диапазоне нагрузки от 2,5 до 250 кН; погрешностью измерения деформации $\pm 0,5\%$ от измеряемой величины.

Для проведения исследований использовались специально подготовленные пробы щебня, отличающиеся различными значениями прочностных свойств (сопротивление истираемости в полочном барабане и сопротивление удару на копре ПМ). Подготовленные пробы укладывались в специально изготовленный стальной ящик размером 680 × 490 × 540 мм с толщиной стенки 4 мм (рис. 1, поз. 10) с послойным уплотнением до плотности 1,60 г/см³, которая в среднем соот-

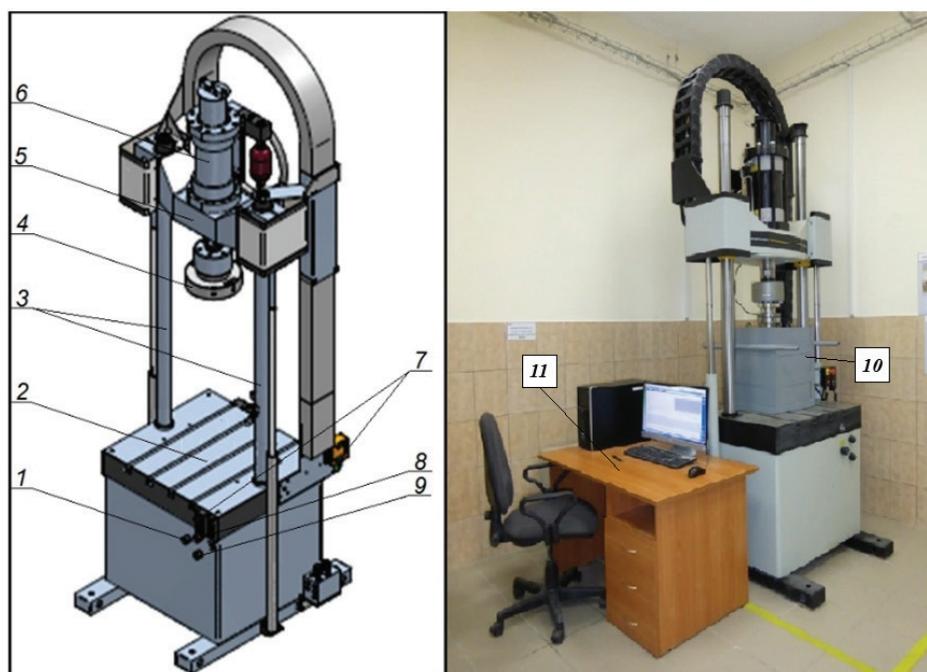


Рис. 1. Схема сервогидравлической испытательной машины INSTRON 8802:
 1 — ручка для управления гидрозажимами траверсы; 2 — стол; 3 — колонны;
 4 — нагрузочная плита; 5 — траверса; 6 — актуатор; 7 — кнопки аварийного выключения машины; 8 — ручка для управления подъемом траверсы; 9 — ручка для управления опусканием траверсы; 10 — металлический ящик размерами $680 \times 490 \times 540$ мм с толщиной стенки 4 мм для засыпки щебеночного балласта; 11 — рабочее место оператора, оборудованное компьютером со специальным лицензионным программным обеспечением, обеспечивающим настройку и установку параметров циклического воздействия, а также запись результатов эксперимента

ветствует плотности щебеночного балласта в балластной призме эксплуатируемых железнодорожных путей.

После подготовки стального короба с уложенным до заданной плотности щебеночным балластом на его поверхность устанавливался штамп. Площадь штампа составила $0,3102 \text{ м}^2$, что в среднем соответствует площади железобетонной полупшпалы с учетом изгиба, которая по данным [13] составляет $0,3092 \text{ м}^2$. Этим обеспечивалась идентичность передачи нагрузки на поверхность щебня как при реальных условиях эксплуатации, так и при стендовых динамических испытаниях.

В проводимых испытаниях сила, передающаяся на штамп, была принята 100 кН ($10,0 \text{ тс}$),

таким образом, давление по подошве штампа в стальном ящике, передающееся щебню, составило $3,2 \text{ кг/см}^2$, что соответствует фактическому напряженному состоянию щебеночного балласта под подошвой железобетонной шпалы при движении массового подвижного состава. В экспериментах частоту приложения нагрузки принимали 7 Гц .

Индекс механического износа щебеночного балласта

Изменение зернового состава щебня в процессе эксплуатации железнодорожного пути сопряжено одновременно с процессами дробления зерен щебня и их истирания. С точки зрения обеспечения стабильности балластной призмы

в этом случае критическим является накопление в балласте фракций менее 25 мм, что в итоге приводит к ухудшению фильтрационных свойств балластного материала, снижению несущей способности балластного слоя и к интенсивному накоплению остаточных деформаций рельсовых нитей.

В ходе испытаний щебня на сопротивление удару на копре ПМ [2] определяется потеря массы пробы за счет образования в нем фракций менее 5 мм, а при испытаниях на сопротивление истираемости в полочном барабане — фракций менее 1,25 мм. Таким образом, можно утверждать, что образование в балластном слое под вибродинамической нагрузкой фракций 1,25–25 мм в основном связано с прочностью зерен щебня и может быть оценено сопротивлением щебня удару, а причиной образования фракций менее 1,25 мм является истирание зерен (абразивный износ), которое оценивается показателем сопротивления истиранию.

В этой связи были проведены лабораторные исследования сопротивляемости удару и истирания одних и тех же проб щебня. Как показывают проведенные исследования, при испытаниях в полочном барабане в щебне образуются как фракции 5–25 мм, которые формируются за счет скалывания зерен щебня, так и фракции менее 1,25 мм за счет абразивного износа. В то же время фракции 1,25–5 мм практически не образуются, что, скорее всего, объясняется их быстрым истиранием в процессе испытания с образованием фракций менее 1,25 мм. Очевидно, что сам показатель сопротивляемости истиранию по своей сути и метод его определения характеризуют появление в зерновом составе щебня фракций менее 1,25 мм.

Несколько иная картина наблюдается при испытании щебня на сопротивление удару. В зерновом составе щебня после испытаний формируются все фракции: 5–25 мм, 1,25–5 мм и менее 1,25 мм. Как следует из требований ГОСТ 7392 [2], сопротивление удару щебня определяется поте-

рей массы щебня за счет образования фракций менее 5 мм, т. е. включая фракции 1,25–5 мм и менее 1,25 мм. Анализируя экспериментальные данные по определению сопротивления щебня удару, установлено, что содержание фракций менее 1,25 мм в общем содержании фракций менее 5 мм составляет в среднем для щебня разных категорий от 45 до 55 %, т. е. в среднем порядка 50 %. Очевидно, что показатель сопротивляемости удару и метод его определения характеризуют как прочность зерен щебня, так и сопротивляемость истиранию.

Принимая во внимание, что в процессе работы щебеночного балласта под вибродинамической нагрузкой одновременно происходят как процессы дробления зерен, так и их абразивный износ, введем обобщенный показатель, который назовем *индексом механического износа балласта*, $I_{\text{мех}}$. Физический смысл данного показателя состоит в том, что он определяет общую потерю массы щебня как за счет дробления зерен при ударе, так и за счет их истирания. Принимая во внимание, что половина фракций (менее 5 мм) в потере массы при определении сопротивления удару щебня на копре ПМ приходится на фракции менее 1,25 мм, определим индекс механического износа балласта как:

$$I_{\text{мех}} = \Delta M_{\text{и}} + 0,5 \cdot \Delta M_{\text{у}}, \quad (1)$$

где $\Delta M_{\text{и}}$ и $\Delta M_{\text{у}}$ — потери массы щебня после испытаний на истираемость в полочном барабане и после испытаний на сопротивление удару на копре ПМ соответственно, определяемые по ГОСТ 7392—2014 [2], %;

0,5 — показатель, учитывающий наличие во фракциях менее 5 мм доли фракций менее 1,25 мм.

Засорение и загрязнение щебеночного балласта под действием поездной вибродинамической нагрузки

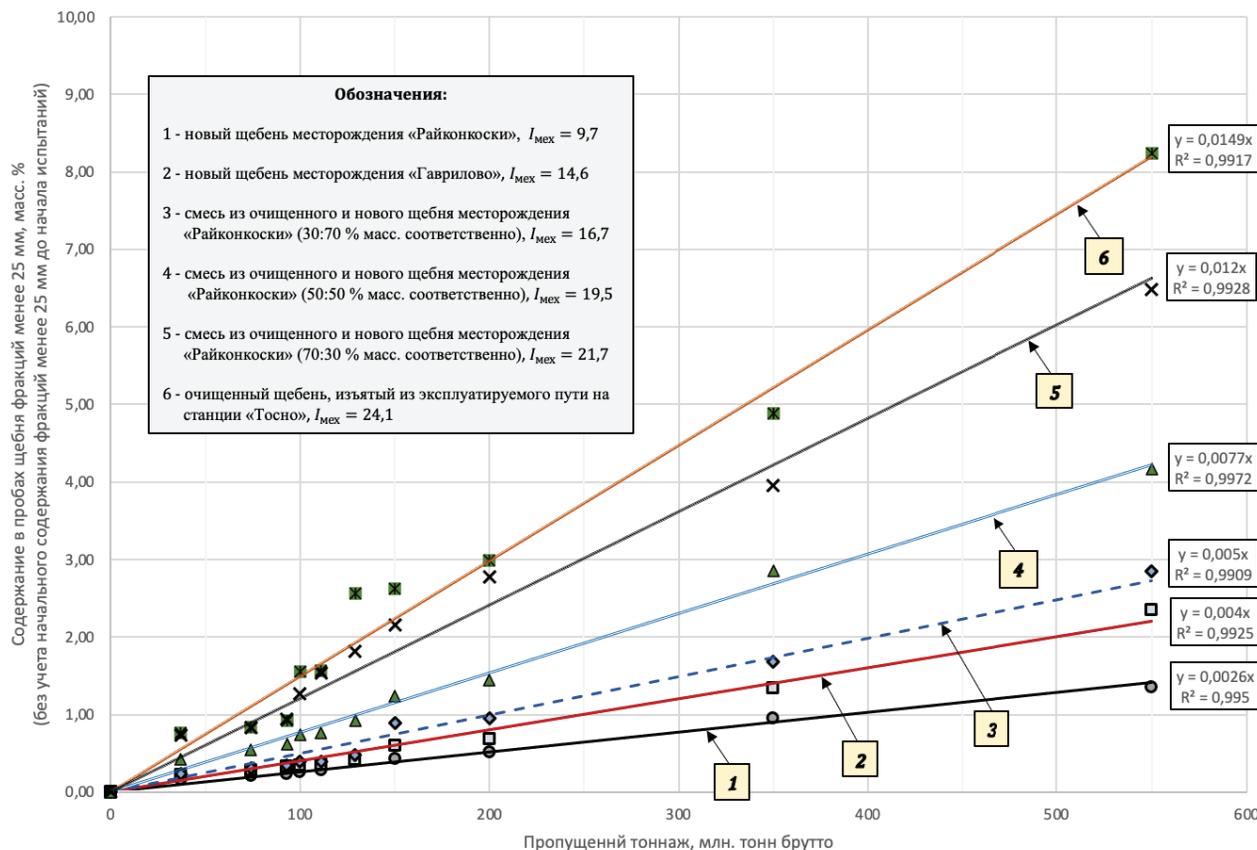


Рис. 2. Образование продуктов собственного дробления (фракции менее 25 мм) в щебне с разным индексом механического износа $I_{\text{мех}}$, в зависимости от наработки тоннажа

Засорение и загрязнение щебеночного балласта под действием поездной вибродинамической нагрузки исследовалось в ходе динамических стендовых испытаний. На рис. 2 приведены зависимости прироста в щебне фракций менее 25 мм, обладающего разным показателем механического износа $I_{\text{мех}}$, в зависимости от пропущенного тоннажа.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показывает, что прирост содержания фракций менее 25 мм по массе в зависимости от пропущенного тоннажа для всех разновидностей проб щебня, отличающихся разным индексом механического износа, подчиняется прямолинейной зависимости. Дальнейшие исследования и преобразования позволили установить функциональ-

ную зависимость между содержанием внутренних засорителей и загрязнителей в щебеночном балласте, появляющихся за счет собственного дробления и истирания зерен под воздействием вибродинамической нагрузки, в зависимости от пропущенного тоннажа и индекса механического износа щебня.

$$A = 0,0007 \cdot m \cdot T \cdot e^{0,1272 \cdot I_{\text{мех}}}, \tag{2}$$

где A — содержание внутренних засорителей и загрязнителей в щебеночном балласте (фракции менее 25 мм в щебне II категории [2]; менее 30 мм в щебне I категории [2] и менее 22,4 мм (рассев на квадратных ситах) — в щебне категории «В» по [2]), масс.%;

T — пропущенный тоннаж, млн. тонн брутто; $I_{\text{мех}}$ — индекс механического износа, %; m — эмпирический коэффициент, принимаемый равным 1,15 для щебня I категории и категории «B» и равным 1,0 для щебня II категории по [2].

Влияние уплотняющего действия путевых машин на изменение зернового состава щебеночного балласта

Внутренние засорители и загрязнители щебеночного балласта, как показывают исследования [10, 14–17], формируются в балластной призме не только под воздействием вибродинамической нагрузки от движущегося подвижного состава, но и под воздействием ударного воздействия рабочих органов выправочно-подбивочных машин и ручного механизированного инструмента. При этом количество внутренних загрязнителей и засорителей в этом случае будет определяться количеством таких уплотнений за время между работами капитального характера.

Исследованиями Г. М. Шахуняца [7], С. Н. Попова [10] и других авторов установлена линейная зависимость между количеством таких уплотнений и засорением щебеночного балласта. Аналогичные выводы были получены и в исследованиях зарубежных авторов [14–16]. Анализ имеющихся литературных источников не позволяет выявить влияние различных путевых машин на образование засорителей в щебеночном балласте за одно уплотнение. Однако имеется ряд публикаций, в которых установлено влияние процесса уплотнения балласта виброплитами на процесс формирования засорителей в щебне. Так, например, в работе [18] установлено, что образование фракций в гранитном щебеночном балласте размером менее 22,4 мм (рассев на квадратных ситах) составляет в среднем 1,1–1,25 % за одно уплотнение. По данным Г. М. Шахуняца [19], количество образующихся засорителей за одно уплотнение твердого щебня зависит от применя-

емых уплотнительных средств и составляет при использовании вибрационных шпалоподбоек 0,6–0,7 масс.%, при использовании ручных шпалоподбоек соответственно 1,3–1,8 масс.%.

В этой связи для оценки влияния уплотняющего воздействия рабочих органов путевых машин был произведен сравнительный анализ зернового состава щебеночного балласта, отобранного на откосах балластной призмы и под подошвой железобетонной шпалы после прохода выправочно-подбивочно-рихтовочных машин ВПР-02 и Doumatic на участках пути Октябрьской дирекции инфраструктуры, на котором выполнялись работы по очистке щебеночного балласта. Бойки машин затрагивают зону уплотнения только под подошвой шпалы, следовательно, сравнивая зерновой состав щебня, отобранного с откосных частей и из-под подошвы шпалы, можно оценить влияние работы шпалоподбоек на появление в щебне фракций размером менее 25 мм. Поскольку работа машин ВПР-02 и Doumatic производилась в среднем через 3–10 дней после глубокой очистки щебня, накоплением засорителей в балласте под действием подвижной вибродинамической нагрузки от проходящих поездов можно пренебречь, а разница в количестве засорителей по массе в подшпальной зоне и в откосной зоне будет определять влияние разрушающего действия шпалоподбоек на балластный слой железнодорожного пути.

Анализ полученных результатов показал, что в среднем каждая подбивка шпал выправочно-подбивочно-рихтовочной машиной приводит к увеличению содержания засорителей на 1,5 %. При этом установить влияние вида путевой машины на интенсивность засорения балласта в исследованиях не удалось. Полученные данные хорошо согласуются с данными Г. М. Шахуняца [19], С. Н. Попова [10] и ряда зарубежных авторов [8, 14, 16]. Разумеется, что различные виды путевых машин будут по-разному оказывать влияние

на засорение балласта продуктами собственного дробления при производстве работ, что является предметом дальнейших исследований. Однако в настоящий момент времени в качестве первого приближения для оценки срока службы щебеночного балласта можно принять влияние работы балластоуплотнительных путевых машин на изменение зернового состава щебеночного балласта одинаковым и равным 1,5 % от прохода каждой машины. Такой подход можно считать допустимым для инженерных целей, обеспечив приемлемую погрешность при прогнозировании накопления загрязнителей и засорителей в балластном слое по мере наработки тоннажа при принятой схеме технического обслуживания железнодорожного пути [20].

Учитывая изложенное, содержание внутренних засорителей в балластном слое железнодорожного пути за счет уплотняющего воздействия путевых машин в зависимости от наработки тоннажа может быть представлено в следующем виде:

$$B = m \cdot e_{\text{упл}} \left(\epsilon_{\text{осн}} + \epsilon_{\text{отд}} + \sum_0^T \epsilon_{\text{п-ппв}} \right), \quad (3)$$

где B — содержание внутренних засорителей в щебеночном балласте (фракции менее 25 мм в щебне II категории; менее 30 мм — в щебне I категории и менее 22,4 мм (рассев на квадратных ситах) — в щебне категории «В» по ГОСТ 7392 [2]), масс.%;

$e_{\text{упл}}$ — количество внутренних засорителей в щебеночном балласте, образующихся от одного уплотнения балласта тем или иным способом, принимаемое равным 1,5 масс.%;
 $\epsilon_{\text{осн}}$, $\epsilon_{\text{отд}}$ — количество уплотнений балласта тем или иным способом, выполняемых после глубокой очистки балласта в период выполнения основных и отделочных работ при принятой технологии производства путевых работ соответственно;

$\epsilon_{\text{п-ппв}}$ — суммарное количество уплотнений балласта тем или иным способом после сдачи участка в эксплуатацию после проведения капитального или среднего ремонта пути, за период времени, соответствующий наработке тоннажа T , выполняемых в ходе планово-предупредительной выправки и подъемочном ремонте пути; m — эмпирический коэффициент, принимаемый равным 1,15 для щебня I категории и категории «В» и равным 1,0 для щебня II категории по ГОСТ 7392 [2].

Исследование загрязнения щебеночного балласта внешними засорителями

Как показывают результаты исследований, в балластном слое железнодорожного пути помимо загрязнения и засорения продуктами собственного дробления и истирания происходит накопление мелких фракций в том числе за счет внешнего загрязнения. Такими источниками являются просыпающиеся с подвижного состава частицы сыпучих грузов, частицы, переносимые ветром, которые откладываются на поверхности балластной призмы, проникающие впоследствии вглубь балластного слоя. На отдельных участках (на подъемах) источником загрязнения и засорения является песок, подающийся под колеса локомотивов. Кроме того, на участках железнодорожного пути, основная площадка земляного полотна которых сложена глинистыми грунтами или грунтами с повышенным содержанием глинистых фракций, в местах с просадками пути в балластный слой проникают также глинистые частицы.

Представляет интерес установление предельного размера фракций, которые могут вызывать пыление при движении подвижного состава. По данным [21], существует минимальная скорость ветра U_{min} , при которой начинается пыление поверхности отвала. Значение этой скорости может быть определено по логарифмическому уравнению Кармана — Прандтля [22]:

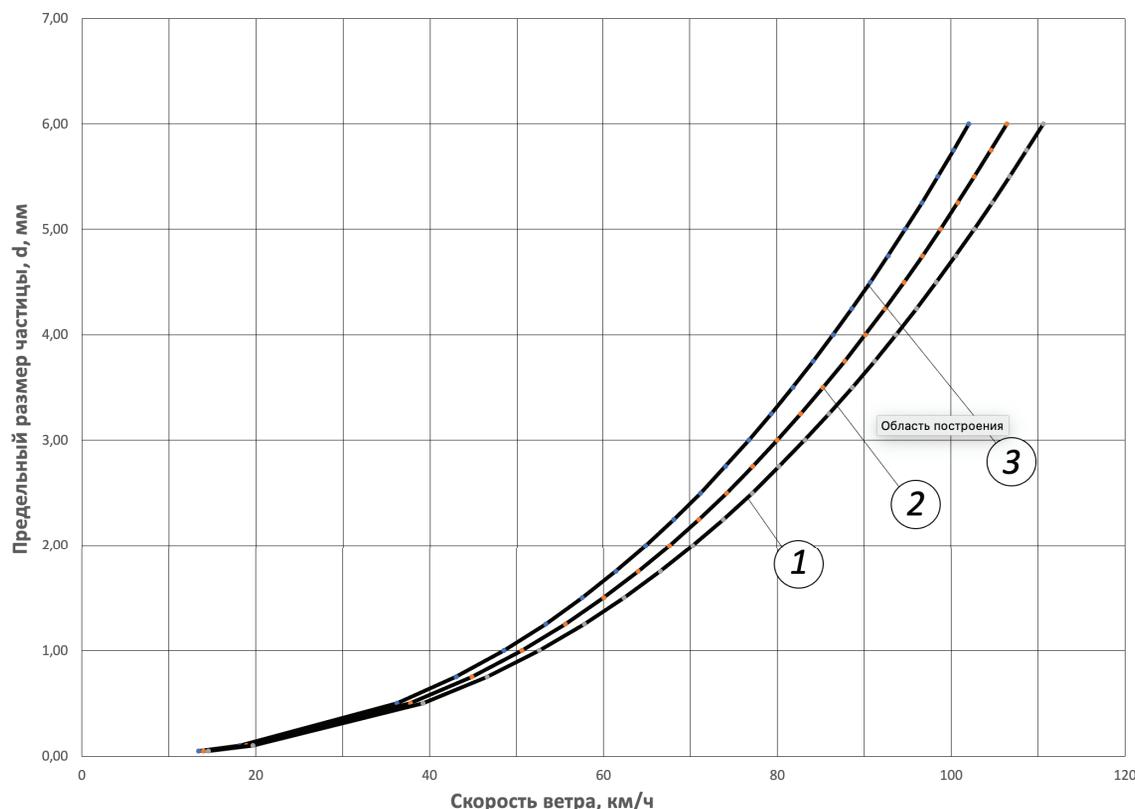


Рис. 3. Предельный размер пылящих частиц в зависимости от скорости ветра:
 1 — при плотности пылящих частиц 2,70 т/м³; 2 — при плотности пылящих частиц 2,50 т/м³;
 3 — при плотности пылящих частиц 2,30 т/м³

$$U_{\min} = A \cdot \left(2,5 \cdot \ln \frac{z}{d_s} + 8,5 \right) n \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_v} \cdot g \cdot d_s}, \quad (4)$$

где A — эмпирический коэффициент, который в среднем может быть принят 0,10;

z — высота, на которой измеряется скорость ветра над поверхностью отвала, м (для движущегося открытого полувагона значение высоты может быть принято 2–3 м);

d_s — размер сдуваемых частиц, м;

ρ_s — плотность частиц сдуваемого сыпучего груза, кг/м³;

ρ_v — плотность воздуха, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с².

На рис. 3 приведен график зависимости предельного размера пылящих частиц с плотностью 2,6 т/м³ от скорости ветра.

В первом приближении можно считать, что скорость движения поезда и скорость ветра на уровне верха борта открытого вагона будут приблизительно равны, тогда по графику рис. 3 нетрудно установить, что при реализуемых сегодня на железных дорогах скоростях движения грузовых поездов 70–90 км/ч максимальный размер фракции, подверженной пылению, составит от 2 до 5 мм. Таким образом, основными продуктами внешнего загрязнения щебеночного балласта будут фракции размером менее 5 мм.

Разработки в 50–80 гг. XX в. методологических подходов к определению степени загрязнения щебеночного балласта от пропущенного тоннажа в основном исходили из предположений прямой линейной зависимости между содержанием фракций различных размеров и пропущенным тоннажем. В частности, такой под-

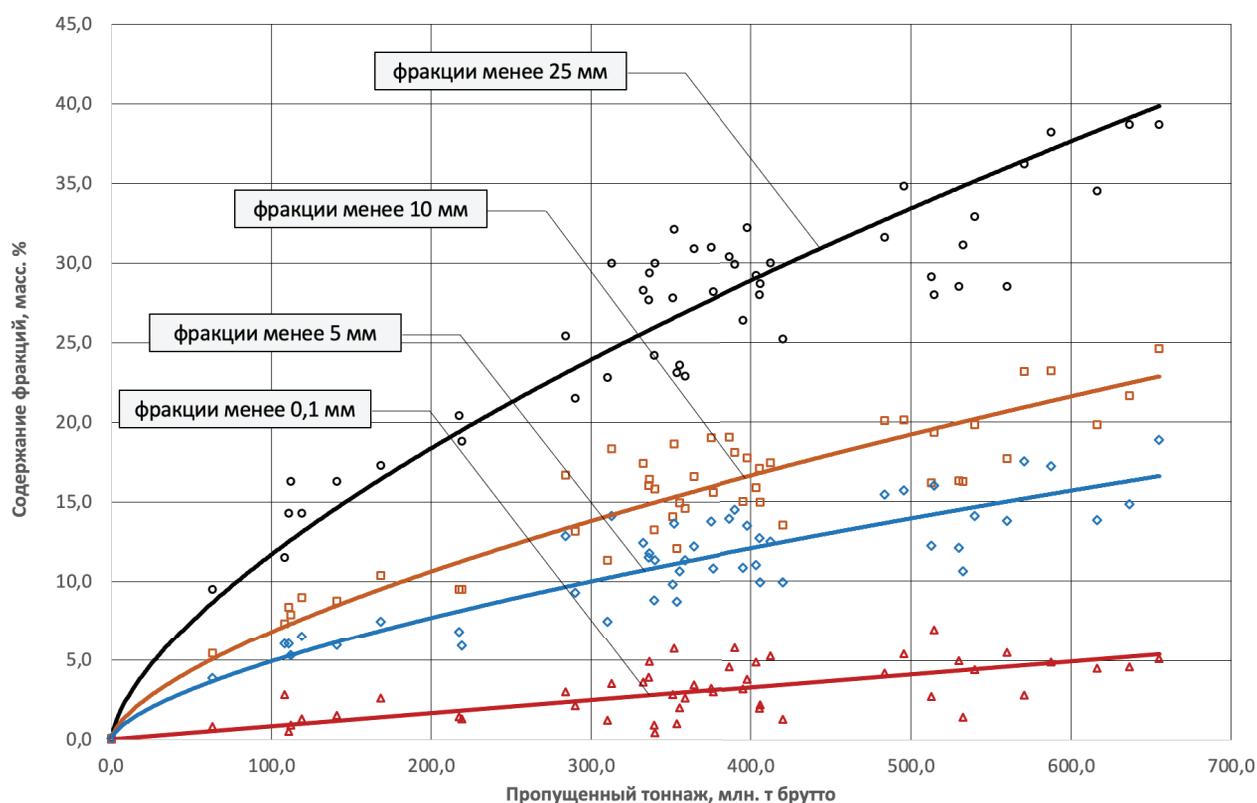


Рис. 4. Накопление различных фракций в щебеночном балласте при наработке тоннажа на грузовых участках железных дорог Октябрьской дирекции инфраструктуры направлений Волховстрой — Кошта и Волховстрой — Мурманск

ход предложен в работах С. Н. Попова [10, 23], В. П. Сычева, А. Ю. Абдурашитова [24]. В работах [5, 6, 25] для оценки загрязнения и засорения балластного слоя используется степенная зависимость, однако относительно фракций менее 5 мм и менее 0,1 мм процесс загрязнения и засорения щебня идет примерно с одинаковой интенсивностью. Для уточнения процесса загрязнения щебня внешними загрязнителями проведены обширные исследования по выявлению процесса накопления фракций менее 25 мм в балластном слое железнодорожного пути по мере наработки тоннажа. Экспериментальные данные были получены путем рассева проб щебня, отобранных с глубины 20–40 см под подошвой шпалы на участках железнодорожных путей Октябрьской дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» (рис. 4).

Анализ представленных зависимостей показывает, что наблюдается практически прямопропорциональная зависимость между пропущенным тоннажем и содержанием фракции менее 0,1 мм по массе в балластном слое железнодорожных путей. В то же время накопление фракций менее 5 мм не подчиняется закону прямой линии, а имеет два периода.

В течение первого периода процесс загрязнения щебня имеет нелинейный характер и подчиняется степенной зависимости. При этом такая зависимость наблюдается до момента накопления в щебеночном балласте около 10–12 % внешних загрязнителей по массе. В дальнейшем процесс загрязнения происходит практически с постоянной интенсивностью и подчиняется закону прямой линии. Как показали результаты опытных

данных, хорошо согласующихся с результатами других авторов [7, 10, 12, 17, 19, 26], причиной такой ситуации является интенсивное загрязнение верхней части балластной призмы, в особенности в пределах первых 10–15 см под подошвой шпалы.

Аккумулятивная способность балластного слоя (способность накапливать засорители и загрязнители), как следует из логики размышлений, равна его пористости (пустотности). В первый период работы, когда в пути уложен чистый щебеночный балласт, его пористость в среднем составляет 35–40 % и проникновение мелких фракций от внешнего загрязнения происходит весьма интенсивно и быстро. С течением времени в верхнем слое балластной призмы происходит аккумуляция внешних загрязнителей и, следовательно, пористость щебня в верхнем слое постепенно снижается. Поэтому, как только загрязнение верхней зоны балластного слоя будет приближаться к 30–35 %, процесс загрязнения всей балластной призмы существенно замедляется (примерно в 4 раза), поскольку дальнейшее загрязнение возможно только после просыпания мелких частиц внутрь балластного слоя.

Таким образом, процесс загрязнения балластного слоя внешними загрязнителями происходит в две стадии. Первая стадия характеризуется интенсивным загрязнением балласта. При этом в целях упрощения дальнейших расчетов с приемлемой для инженерных целей точностью можно принять зависимость накопления внешних загрязнителей на этой стадии, близкой к прямо пропорциональной. Учитывая собственные результаты исследований и предложения Г. М. Шахунянца [7, 17], примем, что загрязнение щебня внешними загрязнителями на первой стадии имеет интенсивность d_1 , а сам процесс загрязнения происходит до тех пор, пока общее загрязнение щебеночного балласта внешними загрязнителями не составит 10 % по массе. Вторая стадия характеризуется значительно мень-

шей интенсивностью загрязнения d_2 , которую в среднем можно принять $d_2 = 0,25 \cdot d_1$ (рис. 4).

Учитывая вышеизложенное уравнение, отражающее процесс накопления внешних загрязнителей в балластном слое в зависимости отработки тоннажа, можно представить в виде:

$$C = \alpha(T) + 0,25 \cdot \xi \cdot \beta(T); \quad (5)$$

$$\alpha(T) = \begin{cases} c \cdot T, & \text{если } c \cdot T \leq 10 \% \\ 10 \%, & \text{если } c \cdot T > 10 \%, \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta(T) = \begin{cases} 0, & \text{если } c \cdot T \leq 10 \% \\ (c \cdot T - 10 \%), & \text{если } c \cdot T > 10 \%, \end{cases} \quad (7)$$

где C — количество внешних загрязнителей в балластном слое, масс.%;

c — интенсивность загрязнения щебеночного балласта внешними загрязнителями на первой стадии загрязнения, % по массе на 1 млн т брутто пропущенного груза, определяемая по [10];

T — пропущенный тоннаж, млн т груза брутто; 10 % — предельное загрязнение балластного слоя внешними загрязнителями, до наступления которого загрязнение идет с постоянной интенсивностью c ;

ξ — коэффициент зональности, по рекомендациям Г. М. Шахунянца [7, 17, 19, 27] принимается 0,96 — при звеньевом пути и 0,92 — при бесстыковом пути.

Математическая модель засорения и загрязнения щебеночного балласта

Выполненные исследования позволяют установить накопление внутренних и внешних загрязнителей и засорителей балластного слоя железнодорожного пути в зависимости отработки тоннажа при разных условиях эксплуатации, системах технического обслуживания железнодорожного пути, а также в зависимости

от исходных прочностных свойств щебня. При этом будем учитывать, что внутреннее и внешнее загрязнение и засорение балласта происходит одновременно. В связи с этим общая загрязненность щебеночного балласта, Q будет выражаться функциональной зависимостью:

$$Q(T) = A(T) + B(T) + C(T) + Q_0, \quad (8)$$

где $A(T)$ — содержание внутренних засорителей и загрязнителей, образующихся в щебеночном балласте за счет собственного дробления и истирания зерен под поездной нагрузкой при наработке тоннажа T , масс.%;
 $B(T)$ — содержание внутренних засорителей, образующихся в щебеночном балласте вследствие дробления зерен под воздействием рабочих органов балластоуплотнительных путевых машин при наработке тоннажа T , масс.%;
 $C(T)$ — содержание внешних засорителей и загрязнителей, накапливающихся в щебеночном балласте при наработке тоннажа T , масс.%;
 Q_0 — начальное загрязнение балласта по массе перед его укладкой в путь, масс.%.

На рис. 5 приведены результаты расчетов процесса загрязнения и засорения щебеночного балласта по формуле (8). На этом же рисунке для сравнения приведены аналогичные зависимости, построенные на основе опытных данных. При выполнении расчетов условно принято, что фактическое и расчетное начальное загрязнение щебеночного балласта $Q_0 = 0,0$ масс.%.

Анализ опытных и расчетных данных, приведенных на рис. 5, показывает их хорошую сходимость. Наибольшее расхождение наблюдается при наработке тоннажа до 50 млн т брутто, что связано с недостаточным количеством опытных данных. В то же время в диапазоне от 200 до 500 млн т брутто это различие несущественно. При этом именно в этом диапазоне наработки

тоннажа исчерпывается ресурс работы щебеночного балласта. Таким образом, исходя из представленных результатов исследования следует признать математическую модель, выраженную зависимостью (8), адекватной, а результаты расчетов достоверными с приемлемой погрешностью для практических целей.

Срок службы щебеночного балласта по условию его предельного износа

Срок службы щебеночного балласта принято исчислять периодом времени между его смежными очистками либо между укладкой нового щебня в путь и ближайшей очисткой, либо между последней очисткой и полной заменой щебеночного балласта на новый. Известно [20], что одним из главных критериев назначения среднего ремонта пути, основной целью которого является восстановление дренирующих и прочностных свойств щебеночного балласта и обеспечения равноупругости подрельсового основания, является его загрязненность. Таким образом, используя зависимость (8), представляется возможным для заданных условий эксплуатации определить предельный (допускаемый) пропущенный тоннаж, при наработке которого щебеночный балласт либо должен быть подвергнут очистке, либо заменен на новый. При таком подходе важнейшей задачей является определение предельного (допускаемого) загрязнения щебеночного балласта, при котором последний снижает свои дренирующие, прочностные и деформативные свойства настолько, что в ходе дальнейшей эксплуатации железнодорожного пути интенсифицируются процессы накопления остаточных деформаций, приводящие к росту затрат на текущее содержание. В соответствии с представлениями Г. М. Шахунянца [7] и других авторов [10, 12, 24, 26, 28, 29] такое предельное загрязнение балласта называется его аккумулятивной способностью $Q_{\text{доп}}$ и определяется количеством загрязнителей,

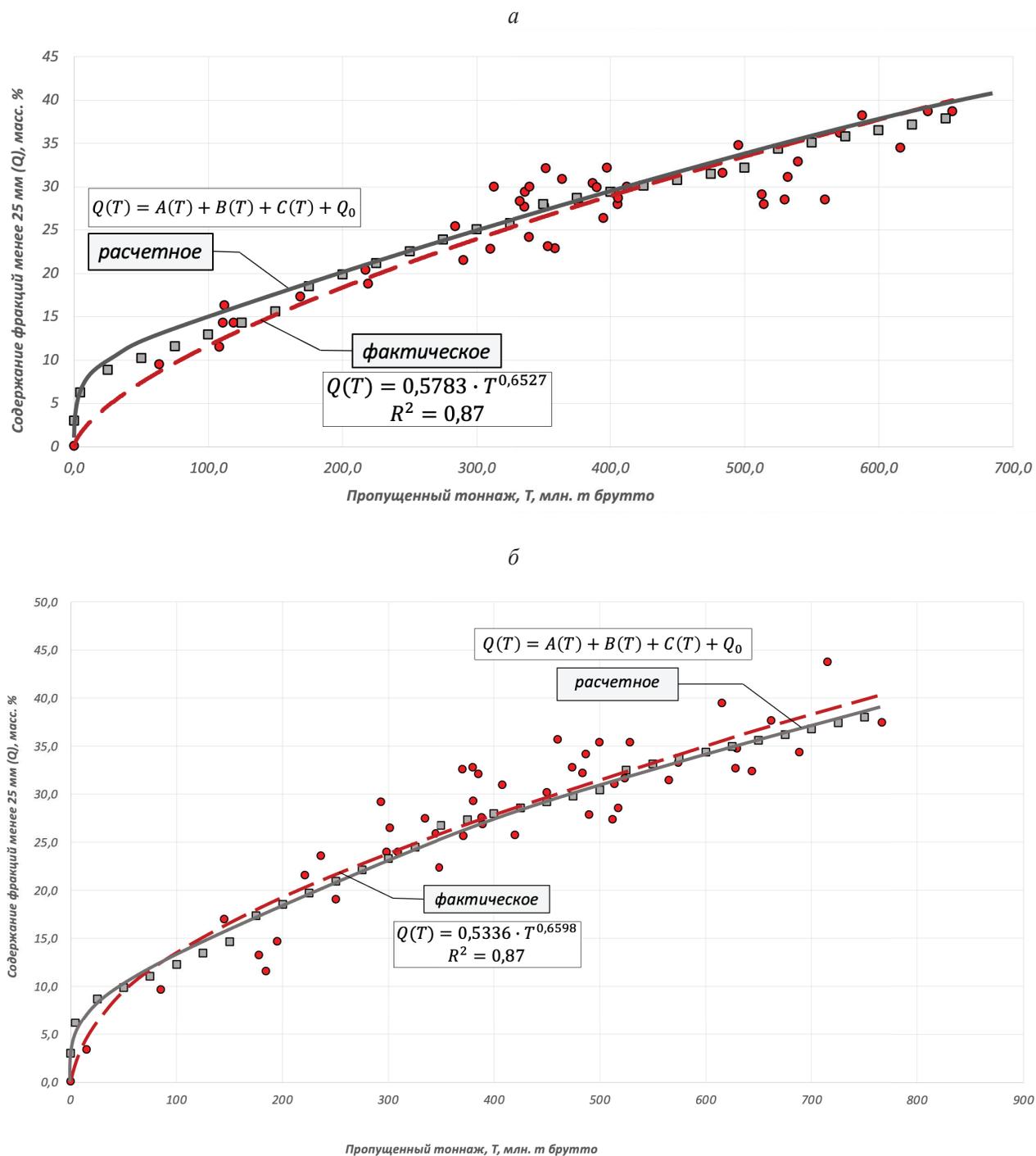


Рис. 5. Накопление в щебеночном балласте мелких фракций в зависимости от наработки тоннажа: *фактическое* — по данным обследования балластного слоя железнодорожного пути; *расчетное* — на основании разработанной математической модели вида (8);
 а — для участков с перевозкой преимущественно сыпучих пылящих грузов;
 б — для участков с перевозкой преимущественно непылящих грузов

которое может разместиться внутри балластного слоя без заметного ухудшения его работы. Таким образом, уравнение предельного (допускаемого) загрязнения щебеночного балласта можно представить следующим образом:

$$A(T_{\text{доп}}) + B(T_{\text{доп}}) + C(T_{\text{доп}}) + Q_0 = Q_{\text{доп}} \quad (9)$$

Принимая во внимание, что срок службы щебеночного балласта в большинстве случаев соответствует его загрязненности свыше 10 %, выражение (9) можно представить следующим образом:

$$0,0007 \cdot m \cdot T_{\text{доп}} \cdot e^{0,1272 \cdot I_{\text{мех}}} + m \cdot e_{\text{упл}} \cdot \epsilon_{\text{упл}} + 10 \% + 0,25 \cdot \xi \cdot (c \cdot T_{\text{доп}} - 10 \%) = Q_{\text{доп}} - Q_0, \quad (10)$$

где $\epsilon_{\text{упл}}$ — общее количество уплотнений щебеночного балласта рабочими органами путевых машин до ближайшей очистки или замены балласта, определяемое применяемыми технологическими процессами ремонта пути и системой его технического обслуживания.

Таким образом, срок службы щебеночного балласта через наработку тоннажа можно выразить как:

$$T_{\text{доп}} = \frac{Q_{\text{доп}} - Q_0 - m \cdot e_{\text{упл}} \cdot \epsilon_{\text{упл}} - 10 \% + 2,5 \cdot \xi}{0,0007 \cdot m \cdot e^{0,1272 \cdot I_{\text{мех}}} + 0,25 \cdot \xi \cdot c} \quad (11)$$

Полученное выражение определяет предельную наработку тоннажа в млн т брутто пропущенного груза, при достижении которой щебеночный балласт с известными механическими свойствами в заданных условиях эксплуатации должен быть либо очищен, либо заменен на новый.

Заключение

Результаты выполненных исследований, приведенные в настоящей работе, позволяют обеспечить достоверное прогнозирование процессов

деградации щебеночного балласта и сроков его службы при эксплуатации железнодорожного пути в заданных условиях.

Однако, как следует из формулы (11), ключевым параметром в определении срока службы является аккумулятивная способность балласта $Q_{\text{доп}}$. Ее величина в соответствии с действующими в ОАО «РЖД» нормативными документами вне зависимости от категории щебня, его механических свойств, формы зерен, вида загрязнителя, влажности загрязнителя принимается для путей всех классов одинаковой и равной 30 % [20].

В то же время известно, что надежная и стабильная работа щебеночного балласта под поездной нагрузкой определяется несущей способностью и деформативностью балластной призмы железнодорожного пути, которые, в свою очередь, зависят от прочностных и деформативных свойств щебня. Следовательно, особую значимость как для науки, так и для практических целей, приобретает также вопрос дальнейшего исследования аккумулятивной способности щебеночного балласта, характеризующегося различными физико-механическими свойствами.

Библиографический список

1. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути // Утв. Распор. ОАО «РЖД» от 14 ноября 2016 г. № 2288/р. — М.: ОАО «РЖД», 2016. — 286 с.
2. ГОСТ 7392—2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2015. — 32 с.
3. Ionescu D. Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast / D. Ionescu // PhD thesis, Wollongong: University of Wollongong, 2004. — 440 p.
4. Pires J. Railway ballast degradation / J. Pires, A. Dumont // 15th Swiss Transport Research Conference, April 15–17, Monte Verità, 2015.
5. Величко Д. В. Оценка состояния балластного слоя в условиях пропуска сверхнормативного тоннажа / Д. В. Величко // Политранспортные системы: материалы

IX Международной научно-технической конференции. — Новосибирск: СГУПС, 2017. — С. 153–158.

6. Величко Д. В. Анализ загрязненности щебеночного балласта / Д. В. Величко, Н. А. Толстикова // Известия Трансиба. — Омск, 2016. — № 3(27). — С. 110–117.

7. Шахунянец Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянец. — М.: Транспорт, 1969. — 536 с.

8. McDowell G. R. The fractal crushing of granular materials / G. R. McDowell, M. D. Bolton, D. Robertson // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 1996. — Vol. 44. — № 12. — Pp. 2079–2101.

9. Paderno C. Ballast behavior under action of tamping and railway traffic / C. Paderno // PhD Thesis. Bern: EPFL, Switzerland, 2010. — 186 p.

10. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути / С. Н. Попов. — М.: Транспорт, 1965. — 183 с.

11. Ефремов Ю. В. Исследования по продлению срока службы путевого балласта / Ю. В. Ефремов // Повышение надежности и эффективности пути и сооружений: межвуз. сб. научн. трудов. — Самара: СамИИТ, 1995. — Вып. 11. — С. 4–6.

12. Туровский И. Я. Определение сроков службы балластного слоя / И. Я. Туровский, М. Б. Смирнова. — М.: МИИТ, 1966.

13. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности // Утв. Распор. ОАО «РЖД» от 22 декабря 2017 г. № 2706/р. — М.: ОАО «РЖД», 2017. — 97 с.

14. Asadzadeh S. M. The Effects of Renewal and Tamping on Ballast and Track Geometry in Turnouts / S. M. Asadzadeh // Intelligent Quality Assessment of Railway Switches and Crossings. — 2011. — Pp. 229–245.

15. Bhanitiz A. A Laboratory Study of Railway Ballast Behaviour under Traffic Loading and Tamping Maintenance / A. Bhanitiz // Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. — Nottingham: The University of Nottingham, 2007. — 234 p.

16. Chrismer S. Track Surfacing with Conventional Tamping and Stone Injection / S. Chrismer. — 1990. — Vol. 91.

17. Шахунянец Г. М. Расчеты верхнего строения пути / Г. М. Шахунянец. — М.: Трансжелдориздат, 1959. — 264 с.

18. Neuhold J. Analysis of railway ballast pollution in regard to traffic load and mechanical impacts / J. Neuhold, M. Landgraf. — 2020. — № 11. — Pp. 24–28.

19. Проектирование железнодорожного пути: учебное пособие / Под ред. Г. М. Шахунянца. — М.: Транспорт, 1972. — 320 с.

20. Технические условия на работы по ремонту железнодорожного пути // Утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 18 января 2013 г. № 75р. — М.: ОАО «РЖД», 2013.

21. Комонов С. В. Ветровая эрозия и пылеподавление: учебное пособие / С. В. Комонов, Е. Н. Комонова. — Красноярск: СФУ ПИ, 2008. — 191 с.

22. РД 153-34.0-02.106—98. Методика оценки ветровой эрозии и пыления угольного штабеля ТЭС. — Екатеринбург: ОАО «УралОРГРЭС», 1998. — 32 с.

23. Попов С. Н. О допускаемых напряжениях на балласт / С. Н. Попов // Взаимодействие пути и подвижного состава и вопросы расчетов пути: сб. научных трудов. — М.: Трансжелдориздат, 1955. — Вып. 97. — С. 353–384.

24. Сычев В. П. Расчет ресурса железобетонных шпал и балласта железнодорожного пути на основе моделирования / В. П. Сычев и др. // Наука и техника транспорта. — 2020. — № 4. — С. 37–44.

25. Бодяков А. Н. Анализ засорителей и загрязнителей щебеночного балласта / А. Н. Бодяков // Образование. Наука. Производство: IX Международный молодежный форум. — Белгород: БГТУ им В. Г. Шухова, 2017. — С. 931–933.

26. Яковлева Т. Г. Определение сроков между прочистками балластного слоя / Т. Г. Яковлева, Г. В. Лидерс // Техничко-экономические расчеты верхнего строения пути. — М.: МИИТ, 1962.

27. Шахунянец Г. М. Железнодорожный путь / Г. М. Шахунянец. — М.: Транспорт, 1987. — 479 с.

28. Чему Ж. Исследование работы железнодорожного балластного слоя и разработка рекомендаций по уве-

личению срока его службы: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ж. Чему / СПб.: ПГУПС, 1997. — 30 с.

29. Nurmikolu A. Degradation and frost susceptibility of crushed rock aggregates used in the structural layers of railway track / A. Nurmikolu // PhD Thesis. Tampere: Tampere University of Technology, 2005. — 325 p.

Дата поступления: 01.08.2022

Решение о публикации: 19.08.2022

Контактная информация:

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительство дорог транспортного комплекса»; kolos2004@inbox.ru

Clogging and Pollution of Broken Stone Ballast During Railway Track Exploitation

A. F. Kolos

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kolos A. F. Clogging and Pollution of Broken Stone Ballast During Railway Track Exploitation // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 3, pp. 558–575. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-3-558-575

Summary

Purpose: Determination of legitimacies of clogging, pollution for broken stone ballast, perceiving vibrodynamic load from a rolling stock, as well as of the ballast life. **Methods:** Theoretical and empirical research methods are used in the study. Theoretical methods are based on the analysis of known models describing broken stone degradation processes during railway track exploitation, and empirical methods — on the pursued experiments and trials. The identification of the legitimacies for pollutants and clogs accumulation in broken stone ballast was based on the results of dynamic bench tests and laboratory determination of broken stone grain composition removed from ballast layer of exploited railway track with various tonnage workout. The methods of statistical processing of test results and regression analysis were used in the study. **Results:** According to the statistical processing of test results and laboratory determinations of broken stone grain composition, functional dependencies were established for the accumulation in broken stone ballast of the products of own crushing, abrasive wear as well as of external pollution, depending on broken stone initial physical and mechanical properties, railway track exploitation conditions and the system of its maintenance. Mathematical model for the prediction of broken stone ballast life depending on railway track section exploitation conditions was developed in the study. **Practical significance:** The results of the study make it possible to prognose broken stone ballast life from the condition of its maximally acceptable pollution and clogging and also to plan reasonably railway track maintenance work.

Keywords: Railway track, broken stone ballast, ballast layer, clogging of broken stone ballast, pollution of broken stone ballast, broken stone ballast life.

References

1. *Instruktsiya po tekushchemu sodержaniyu zheleznodorozhnogo puti. Utv. raspор. OAO “RZhD” № 2288/r ot 14.11.2016* [Instructions for the current maintenance of the railway track. Approved. thrust. OJSC

Russian Railways No. 2288/r dated 11/14/2016]. Moscow: “RZhD” Publ., 2016. 286 p. (In Russian)

2. *GOST 7392—2014 Shcheben’ iz plotnykh gornyykh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 7392—2014 Crushed stone

from dense rocks for the ballast layer of the railway track. Specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 32 p. (In Russian)

3. Ionescu D. Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast. PhD thesis, Wollongong: University of Wollongong, 2004. 440 p.

4. Pires J., Dumont A. Railway ballast degradation. 15 th Swiss Transport Research Conference April 15–17, Monte Verità, 2015.

5. Velichko D. V. Otsenka sostoyaniya ballastnogo sloya v usloviyakh propuska sverkhnormativnogo tonnazha [Assessment of the state of the ballast layer in the conditions of passing excess tonnage]. *Politransportnye sistemy. Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Polytransport systems. Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference]. Novosibirsk: SGUPS Publ., 2017, pp. 153–158. (In Russian)

6. Velichko D. V., Tolstikova N. A. *Analiz zagryazennosti shchebenochnogo ballasta* [Analysis of the contamination of crushed stone ballast]. Omsk: Izvestiya Transiba Publ., 2016, I. 3 (27), pp. 110–117. (In Russian)

7. Shakhunyants G. M. *Zheleznodorozhnyy put'* [Railway way]. Moscow: Transport Publ., 1969. 536 p. (In Russian)

8. McDowell, G. R., Bolton, M. D., Robertson, D. The fractal crushing of granular materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1996, vol. 44, I. 12. pp. 2079–2101.

9. Paderno C. Ballast behavior under action of tamping and railway traffic. PhD Thesis. Bern: EPFL, Switzerland, 2010. 186 p.

10. Popov S. N. *Ballastnyy sloy zheleznodorozhnogo puti* [Ballast layer of the railway track]. Moscow: Transport Publ., 1965. 183 p. (In Russian)

11. Efremov Yu. V. Issledovaniya po prodleniyu sroka sluzhby putevogo ballasta [Research on extending the service life of track ballast]. *Mezhvuz. sb. nauchn. trudov, vyp. 11 «Povyshenie nadezhnosti i effektivnosti puti i sooruzheniy»* [Sat. scientific works, no. 11 “Improving the reliability and efficiency of the track and structures”]. Samara: SamIIT Publ., 1995, pp. 4–6. (In Russian)

12. Turovskiy I. Ya., Smirnova, M. B. *Opreделение сроков sluzhby ballastnogo sloya* [Determination of the service life of the ballast layer]. Moscow: MIIT Publ., 1966. (In Russian)

13. *Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti. Utv. rasp. OAO “RZhD” № 2706/r ot 22.12.2017* [Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track according to the conditions for ensuring reliability. Approved. thrust. OJSC Russian Railways No. 2706/r dated 12/22/2017]. Moscow: “RZhD” Publ., 2017. 97 p. (In Russian)

14. Asadzadeh S. M. The Effects of Renewal and Tamping on Ballast and Track Geometry in Turnouts. *Intelligent Quality Assessment of Railway Switches and Crossings*. 2011, pp. 229–245.

15. Bhanitiz A. A Laboratory Study of Railway Ballast Behaviour under Traffic Loading and Tamping Maintenance. Thesis submitted to The University of Nottingham for the degree of Doctor of Philosophy. Nottingham, The University of Nottingham, 2007. 234 p.

16. Chrismer S. Track Surfacing with Conventional Tamping and Stone Injection. 1990, vol. 91.

17. Shakhunyants G. M. *Raschety verkhnego stroeniya puti* [Calculations of the upper structure of the track]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1959. 264 p. (In Russian)

18. Neuhold J., Landgraf M. Analysis of railway ballast pollution in regard to traffic load and mechanical impacts. 2020, pp. 24–28.

19. *Proektirovanie zheleznodorozhnogo puti* [Designing a railway track]. Moscow: Transport Publ., 1972. 320 p. (In Russian)

20. *Tekhnicheskie usloviya na raboty po remontu zheleznodorozhnogo puti* [Specifications for work on the repair of the railway track]. *Utverzhdeny Rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 18 yanvarya 2013 g. N 75r* [Approved by the Order of Russian Railways OJSC dated January 18, 2013 N 75r]. Moscow: «RZhD» Publ., 2013. (In Russian)

21. Komonov S. V., Komonova E. N. *Vetrovaya eroziya i pylepodavlenie* [Wind erosion and dust suppression]. Krasnoyarsk: SFU PI Publ., 2008. 191 p. (In Russian)

22. *RD 153-34.0-02.106-98 Metodika otsenki vetrovoy erozii i pyleniya ugol'nogo shtabelya TES* [RD 153-34.0-

02.106-98 Methodology for assessing wind erosion and dusting of the coal pile of TPP]. Ekaterinburg: “UralORGRES” Publ., 1998. 32 p. (In Russian)

23. Popov S. N. O dopuskaemykh napryazheniyakh na ballast [On the allowable stresses on the ballast]. *Vzaimodeystvie puti i podvizhnogo sostava i voprosy raschetov puti* [Interaction of the track and rolling stock and issues of track calculations]. Moscow: Transzheldorizdat Publ., 1955, pp. 353–384. (In Russian)

24. Sychev V. P. Raschet resursa zhelezobetonnykh shpal i ballasta zheleznodorozhnogo puti na osnove modelirovaniya [Calculation of the resource of reinforced concrete sleepers and railway track ballast based on modeling]. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport Science and Technology]. 2020, vol. 4, pp. 37–44. (In Russian)

25. Bodyakov A. N. Analiz zasoriteley i zagryazniteley shchebenochnogo ballasta [Analysis of weeds and pollutants of crushed stone ballast]. «IX Mezhdunarodnyy molodezhnyy forum “Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo” [“IX International Youth Forum “Education. Science. Production”]. Belgorod: BGTU im V.G. Shukhova Publ., 2017, pp. 931–933. (In Russian)

26. Yakovleva T. G., Lidets, G. V. Opredelenie srokov mezhdu prochistkami ballastnogo sloya [Determining the time between cleanings of the ballast layer.]. “*Tekhniko-*

ekonomicheskie raschety verkhnego stroeniya puti” [“Technical and economic calculations of the upper structure of the track”]. Moscow: MIIT Publ., 1962.

27. Shakhunyants G. M. *Zheleznodorozhnyy put’* [Railway way]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p. (In Russian)

28. Chemu Zh. *Issledovanie raboty zheleznodorozhnogo ballastnogo sloya i razrabotka rekomendatsiy po uvelicheniyu sroka ego sluzhby. Kand. Diss* [Study of the operation of the railway ballast layer and the development of recommendations for increasing its service life. Cand. Diss]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 1997. 30 p. (In Russian)

29. Nurmikolu A. Degradation and frost susceptibility of crushed rock aggregates used in the structural layers of railway track. PhD Thesis. Tampere: Tampere University of Technology, 2005. 325 p.

Received: August 01, 2022

Accepted: August 19, 2022

Author’s information:

Aleksey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Construction of Routes in Transportation System;
kolos2004@inbox.ru