

Автоматизация расчета толщины подбалластного защитного слоя

В.А. Подвербный✉, К.М. Титов, П.Н. Холодов, О.А. Гнездилова

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉vpodverbniy@mail.ru

Резюме

В статье рассмотрена проблема обеспечения стабильности подбалластной зоны железнодорожного пути, приведен обзор нормативных документов и научных работ по теме исследования, показана ее значимость для строительства и эксплуатации железнодорожных путей в России и за рубежом. Проанализирована методика определения толщины подбалластного защитного слоя по условию ограничения величины морозного пучения его основания и обеспечения необходимой прочности подстилающего слоя, изложенная в СП 32-104-98. Разработана программа RASCHET_PZS.xlsx, с помощью которой проведен тестовый расчет толщины подбалластного защитного слоя для насыпи проектируемой железнодорожной линии третьей категории, сооружаемой из глинистых грунтов. Выполнена аппроксимация графика зависимости толщины дренирующего слоя $H_{др} = f(f)$ для метеостанций Красноярск при сумме градусо-суток отрицательных температур наружного воздуха (Ω) $1\ 830^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}$ и Иркутск при $2\ 364^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут.}$, а также аппроксимация графика $\sigma = f(h)$ – суммарной кривой нормальных напряжений для четырехосных вагонов при перспективной нагрузке на ось $294\ \text{кН/ось}$ ($30\ \text{тс/ось}$). Разработаны блоки полуавтоматического и автоматического поиска координаты $h_{z(\text{проч})}$, м. В программе RASCHET_PZS.xlsx определена толщина защитного слоя для Красноярск $h_{z(\text{пуч})} = 0,91\ \text{м}$ и Иркутск $h_{z(\text{пуч})} = 1,65\ \text{м}$. Сделан вывод, что следует продолжить работу над программой и создать базу расчетов для различных метеостанций Сибирского региона. С целью проработки множества вариантов проектируемой линии на предварительном предпроектном этапе с учетом потребности в дренирующем грунте необходимо использовать автоматизацию расчетов толщины подбалластного защитного слоя. При этом показатель объема потребного дренирующего грунта по вариантам трассы с учетом удаленности от разведанных карьеров может стать одним из важных критериев при многокритериальной оптимизации множества альтернатив.

Ключевые слова

подбалластный защитный слой, прочность подстилающего слоя, автоматизация расчета толщины защитного слоя, железнодорожная линия третьей категории

Для цитирования

Автоматизация расчета толщины подбалластного защитного слоя / В.А. Подвербный, К.М. Титов, П.Н. Холодов, О.А. Гнездилова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2022. № 4 (76). С. 57–71. DOI 10.26731/1813-9108.2022.4(76).57-71.

Информация о статье

поступила в редакцию: 31.10.2022 г.; поступила после рецензирования: 22.11.2022 г.; принята к публикации: 23.11.2022 г.

Automation of the sub-ballast protective layer thickness calculation

V.A. Podverbnyi✉, K.M. Titov, P.N. Kholodov, O.A. Gnezdilova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉vpodverbniy@mail.ru

Abstract

The article considers the problem of ensuring the stability of the sub-regional zone of the railway track, provides an overview of regulatory documents and scientific papers on the research topic, shows the importance of the topic for the construction and operation of the railway track in Russia and abroad. The technique of determining the thickness of the sub-ballast protective layer is analyzed conditional of limiting the amount of frost heaving of its base and ensuring the necessary strength of the underlying layer, set out in SR 32-104-98. The RASCHET_PZS.xlsx program has been developed, with the help of which a test calculation of the thickness of the sub-ballast protective layer for the embankment of the projected railway line of third category, constructed from clay soils, was carried out. The approximation of the dependence graph of the drainage layer thickness $H_{dr} = f(f)$ for the weather stations of the city of Krasnoyarsk at $\Omega = 1830\ ^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ and the city of Irkutsk at $\Omega = 2364^{\circ}\ \text{C day}$ was performed as well as the approximation of the graph $\sigma = f(h)$ – the total curve of normal stresses for 4-axle wagons with a prospective load on the axis of $294\ \text{kN/axis}$ ($30\ \text{ts/axis}$). Blocks of semi-automatic and automatic search for coordinates $h_{z(\text{str})}$, m were worked out. In the RASCHET_PZS.xlsx program the thickness of the protective layer is determined for Irkutsk $h_{z(\text{frost heave})} = 1,65\ \text{m}$ and for Krasnoyarsk $h_{z(\text{frost heave})} = 0,91\ \text{m}$. It is concluded that work on the program should be continued and a calculation base should be created for various weather stations in the Siberian region. To study a variety of options for the projected line at the preliminary pre-design stage, taking into account the need for drainage soil, it is necessary to use automation of calculations of the ballast protective layer thickness. At the same time, the indicator of the volume of required drainage soil for the route options, taking

into account their distance from the explored quarries, can become one of the important criteria for multi-criteria optimization of a variety of alternatives.

Keywords

sub-ballast protective layer, strength of the underlying layer, automation of calculation of the thickness of the protective layer, railway line of the third category

For citation

Podverbnyi V.A., Titov K.M., Kholodov P.N., Gnezdilova O.A. Avtomatizatsiya rascheta tolshchiny podballastnogo zashchitnogo sloya [Automation of the sub-ballast protective layer thickness calculation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, no. 4 (76), pp. 57–71. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.4(76).57-71.

Article info

Received: October 31, 2022; Revised: November 22, 2022; Accepted: November 23, 2022.

Введение

Недостаточная несущая способность грунтов, расположенных в подбалластной зоне верхнего строения железнодорожного пути, а также неравномерное морозное пучение этих грунтов приводят к развитию деформаций основной площадки земляного полотна, что, в свою очередь, вызывает не только увеличение затрат на содержание пути, но и сокращает продолжительность жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути [1].

Для скоростных и высокоскоростных линий проблема обеспечения стабильности подбалластной зоны имеет большое значение [2], так же как для линий, на которых после реконструкции предусматривается повышение осевых и погонных нагрузок для грузовых поездов [3].

Решением проблемы является устройство подбалластных защитных слоев, имеющих повышенные прочностные и деформационные свойства.

Нормативные документы

Основные требования по проектированию подбалластного защитного слоя изложены в сводах правил: СП 119.13330.2017 «Актуализированная редакция СНиП 32-01-95» (с изменением № 1 от 24 декабря 2019 г.) [4] и СП 32-104-98 «Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1 520 мм» [5].

В 2012 г. были разработаны и утверждены следующие документы:

– Инструкция по устройству подбалластных защитных слоев при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути [6];

– Технические условия на смеси щебеночно-гравийно-песчаные для защитных

слоев подбалластного основания железных дорог [7];

– Временные технические условия на нормативы и методы определения модуля деформации подбалластного основания при реконструкции пути [8].

Не потеряли своей значимости и нормативные документы, разработанные ранее:

– Методические рекомендации по проектированию земляного полотна железных дорог на пучинистых грунтах в суровых климатических условиях [9];

– Ведомственные строительные нормы ВСН 61-89 – Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты [10];

– ЦПИ 24 – Технические указания по устранению пучин и просадок железнодорожного пути [11].

Обзор работ по теме исследования

Значительным вкладом в разрабатываемую проблему является работа [12], в которой обоснованы нормативы осадок рельса и подпального основания, которые могут быть получены по результатам непрерывных по протяжению нагрузочных испытаний мобильными диагностическими комплексами СПМ-18 и СМ-4. После чего нормативы используются для оценки состояния железнодорожного пути.

Важным вопросом является выбор наилучшего варианта технологического процесса по устройству подбалластного защитного слоя.

В работе [13] проведено многокритериальное технико-экономическое сравнение вариантов создания подбалластных защитных слоев с использованием объемной георешетки. Варианты отличались по способу ее укладки, по раз-

новидности машин, применяемых для выгрузки щебеночно-гравийно-песчаной смеси, а также машин, используемых для ее уплотнения.

Для выбора наилучшего варианта технологического процесса в зависимости от характеристики участка строительства или реконструкции, наличия путевых комплексов и поездной обстановки могут быть использованы методы принятия решений в многокритериальных недетерминированных задачах проектирования [14].

Как отмечается в [15, 16] применение объемной георешетки увеличивает значение модуля упругости армированного слоя в 1,8–5,0 раз в зависимости от конструкции защитного слоя, модуля упругости подстилающего слоя и модуля упругости заполняющего материала.

Новым направлением является применение метода холодной регенерации грунтов для усиления основной площадки земляного полотна. В работе [17] предложен график производства основных работ по замене рельсошпальной решетки и устройству защитного слоя из грунтобетона толщиной 20 см по технологии холодной регенерации грунта с использованием ресайклеров WR 2500 с одновременной подачей водоцементной суспензии из смесительной установки WM 400 с последующим уплотнением грунтобетонного слоя.

Задача исследования возможности и эффективности применения грунтобетона в конструкциях защитных слоев является весьма актуальной [18].

Стабилизация грунтов основной площадки земляного полотна специальными составами позволяет значительно повысить прочность грунтов на сжатие при снижении их способности к морозному пучению [19].

В работе [20] на основе обобщения опыта применения и устройства защитных подбалластных слоев и результатов проведенных натурных экспериментов определена эффективность использования геосинтетиков для повышения прочности грунтов в рабочей зоне основной площадки земляного полотна, а также исследована технология создания подбалластных защитных слоев с использованием путевой машины АНМ-800R.

Установлены преимущества использования такой технологии:

– возможность непрерывного формирования защитного слоя толщиной до 50 см без демонтажа рельсошпальной решетки;

– применение материала балластной призмы, измельченного, увлажненного и смешанного с гравийно-песчаной смесью;

– устройство разделительного и армирующего слоев за счет укладки геосинтетиков в темпе машины;

– сокращение времени закрытия перегона при обеспечении пропуска поездов по соседнему пути.

Предложенная технология в настоящее время может применяться не только с помощью машин австрийского производства АНМ-800R [21], могут использоваться и отечественные путевые машины ЩОМ-МР и МР-100 и путевые комплексы [22–24].

В ряде работ исследуется влияние на деформативность пути упругой прослойки подбалластных матов в конструкции подшпального основания [25], а также оцениваются результаты испытаний осадки основания штампа на щебеночном основании, стабилизированном георешеткой, по сравнению с нестабилизированным, с использованием численного моделирования напряженно-деформированного состояния [26].

Следует отметить ряд диссертационных исследований, посвященных рассматриваемой проблеме.

В диссертации [27] проведены наблюдения за влиянием защитных слоев на деформационные характеристики пути на опытной насыпи экспериментального кольца Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). Сделаны выводы о необходимости дифференциации схем усиления подбалластного основания в зависимости от значений показателя деформативности рабочей зоны земляного полотна. Предложен критерий-ограничение стабильной работы пути в виде условного приведенного модуля деформации подбалластного основания не ниже 35 МПа.

В диссертации [28] по результатам полевых экспериментов на объектах Московской железной дороги и расчетов напряжений, действующих на основную площадку земляного полотна, с использованием метода конечных элементов, реализованного в программно-вычислительном комплексе «Katran», предложены конструктивно-технологические решения по повышению стабильности геометрии рель-

совой колеи на участках обращения поездов повышенного веса и длины.

В диссертации [29] разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния грунтов балластного слоя и земляного полотна, учитывающая распространение повышенных инерционных сил и снижение прочностных характеристик грунтов подшпального основания при обращении подвижного состава с осевыми нагрузками до 300 кН, и предложены требования к материалу и конструкции балластного слоя железнодорожного пути.

За рубежом также проводят научные исследования в данной области.

В работе [30] по результатам полевого эксперимента, проведенного на земляном полотне железной дороги Пекин – Сюань, путем определения коэффициента уплотнения (contraction meter value, CMV) и модуля динамической деформации (dynamic deflection modulus, Evd) крупнозернистых грунтов земляного полотна была исследована пространственная однородность уплотнения. Предложенный анализ устойчивости и пространственной однородности грунтов может помочь подрядчику в выявлении плохо уплотненных участков или участков с сильно неоднородными условиями, которые нуждаются в дополнительном уплотнении или модификации грунтов.

В работе [31] проведено исследование на полномасштабных испытательных стендах двух типов балластного основания – со стабилизирующим материалом из цементно-асфальтового раствора (cement asphalt mortar, CAM) и без него. Установлено, что балластное основание в первом случае создает прочную мембрану между частицами балласта, которая обеспечивает сцепление и упрочняющий эффект для всего слоя балласта, тем самым усиливая структурную жесткость железнодорожного полотна. Сделан вывод, что предложенная технология позволит сократить общую стоимость жизненного цикла верхнего строения пути, особенно на интенсивно эксплуатируемых линиях высоких категорий.

В работе [32] проведено экспериментальное исследование по изучению влияния модификации диоксидом кремния и полипропиленовым волокном на прочность и поведение при замораживании-оттаивании стабилизированной известью каолиновой глины. Модифицированная диоксидом кремния и волокнами глина,

обогащенная известью, достигла максимальной прочности при 0,25 % добавленных волокон и 10 % диоксидов кремния. Результаты показали, что модифицированная каолиновая глина может быть экономичной и экологически чистой альтернативой в проектах по стабилизации грунтов земляного полотна.

В работе [33] проведено сравнение основных показателей, используемых для оценки степени уплотнения и механических характеристик геотехнической системы земляного полотна. В качестве контрольного показателя рекомендуется использовать коэффициент уплотнения, а показатели статистического модуля деформации Ev2 и динамического модуля деформации Evd использовать как контрольные для оценки качества железнодорожного земляного полотна.

В работе [34] приведены результаты испытания по виброзащите на различных глубинах земляного полотна до и после его усиления. Установлено, что виброускорение усиленного земляного полотна на глубине 4,5 м не превышает 60 % от виброускорения на его поверхности.

В работе [35] представлены итоги исследования участка земляного полотна железной дороги большой протяженности – Мэнхуа (Menghua). Получены закономерности динамических характеристик под воздействием поездной нагрузки грунтов земляного полотна, стабилизированных цементом и известью. Результаты исследования убедительно доказали, что при одинаковых условиях показатели критического динамического напряжения грунтов земляного полотна, стабилизированных цементом, в 1,2 раза лучше, чем у грунтов, стабилизированных известью.

Таким образом, можно утверждать, что проблема улучшения грунтов основной площадки земляного полотна и исследования различных конструкций подбалластных защитных слоев является значимой для строительства и эксплуатации железнодорожного пути в России и за рубежом.

На предпроектном этапе для предварительной оценки потребности в дренирующем грунте для создания подбалластных защитных слоев для земляного полотна, сооружаемого из недренирующих грунтов, предлагается использовать методику расчета подбалластного защитного слоя в соответствии с СП 32-104-98 [5].

Методика определения толщины подбалластного защитного слоя в соответствии со сводом правил СП 32-104-98

Толщину подбалластного защитного слоя определяют расчетами, исходя из двух условий: обеспечения требуемой прочности основной площадки и ограничения величины деформаций железнодорожного пути под воздействием морозного пучения грунтов земляного полотна.

Требуемая толщина защитного слоя из песчано-гравийных грунтов по условию ограничения величины морозного пучения его основания $h_{з(пуч)}$ определяется по формуле:

$$h_{з(пуч)} = n \cdot m \cdot H_{др} - h_6, \quad (1)$$

где n – коэффициент, учитывающий вид конструкции земляного полотна ($n = 1,0$ – для нулевых мест; $0,95$ – для выемок глубиной более $1,0$ м; $1,05$ – для насыпей высотой более $1,0$ м; m – коэффициент, учитывающий увеличение глубины промерзания земляного полотна по сравнению со средними данными; $H_{др}$ – суммарная толщина слоя дренирующих грунтов, рассчитываемая как $H_{др} = h_{з(пуч)} + h_6$, м; h_6 – толщина балластного слоя от верха балластной призмы до низа балластного слоя, м.

Коэффициент, учитывающий увеличение глубины промерзания земляного полотна по сравнению со средними данными определяется по формуле:

$$m = \sqrt{\frac{\Omega_{10}}{\Omega}}, \quad (2)$$

где Ω_{10} – максимальная в десятилетнем периоде сумма градусо-суток отрицательных температур наружного воздуха за год, °С·сут.;

Ω – многолетняя средняя сумма градусо-суток отрицательных температур наружного воздуха, °С·сут.

Значения Ω и Ω_{10} определяются по СП 131.13330.2020. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. Строительная климатология [36].

Для Красноярска $\Omega = 1\,830$ °С·сут.; $\Omega_{10} = 2\,050$ °С·сут. Для Иркутска $\Omega = 2\,364$ °С·сут.; $\Omega_{10} = 2\,658$ °С·сут.

Тогда коэффициент m , рассчитанный для Красноярска по формуле (2) равен:

$$m = \sqrt{\frac{2050}{1830}} = 1,06.$$

Значения интенсивности пучения определяют по СП 32-104-98 [5].

При определении интенсивности пучения учитывают прогнозируемый режим поверхностных и грунтовых вод, устанавливающийся в результате строительства или реконструкции земляного полотна и противодеформационных мероприятий.

В тестовом примере расчет выполнен для третьей категории проектируемой линии, район проектирования – метеостанция г. Красноярск, насыпь сооружается из суглинков с расчетной интенсивностью пучения $f = 0,07$.

На рис. 1 приведен график толщины дренирующего слоя $H_{др} = f(f)$ при $\Omega = 1\,830$ °С сут., обеспечивающей не превышение допустимой величины пучения (для допустимой величины пучения $\Delta = 25$ мм).

На графике показано определение значения $H_{др}$ при $f = 0,07 = 7\%$ для грунтов насыпи, отсыпанной из суглинков, при $\Omega = 1\,830$ °С сут.

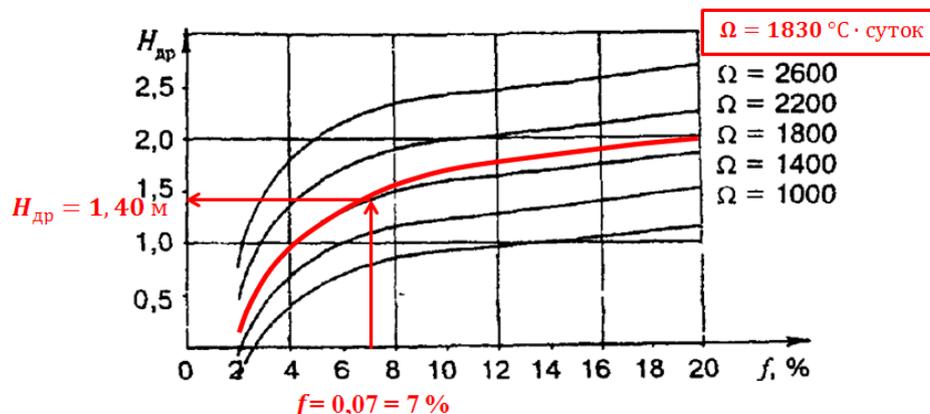


Рис. 1. График зависимости толщины дренирующего слоя $H_{др} = f(f)$ при $\Omega = 1\,830$ °С сут

Fig. 1. Graph of the dependence of the drainage layer thickness $H_{dr} = f(f)$, at $\Omega = 1\,830$ °С day

Значение найдено графически $H_{др} = 1,40$ м.

Для третьей категории проектируемой линии и принятой конструкции верхнего строения пути – бесстыковой путь со скреплением ЖБР-65Ш на железобетонных шпалах ШЗД (толщина шпалы в средней части 0,20 м), толщина щебня под шпалой 0,40 м имеет значение $h_6 = 0,20 + 0,40 = 0,60$ м.

Расчет толщины подбалластного защитного слоя по первому условию выполним для насыпи высотой более 2 м.

По формуле (1) значение толщины защитного слоя по первому условию определится следующим образом:

$$h_{з(пуч)} = 1,05 \cdot 1,06 \cdot 1,40 - 0,60 = 1,56 - 0,60 = 0,96 \text{ м.}$$

Таким образом, по условию ограничения величины морозного пучения основания толщина защитного слоя должна быть не менее 0,96 м.

Вторым этапом необходимо выполнить расчет толщины подбалластного защитного слоя по условию обеспечения необходимой прочности подстилающего слоя.

В соответствии с СП 32-104-98 для предотвращения возможности возникновения в грунте деформаций, пластических сдвигов суммарные нормативные напряжения (σ , кПа) от поездной нагрузки, собственного веса грунта и веса верхнего строения пути не должны превышать критической для данного грунта нагрузки ($P_{кр}$, кПа), величина которой определяется по формуле:

$$P_{кр} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{C}{\text{tg } \varphi} + \gamma \cdot h \right)}{\text{ctg } \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma \cdot h, \quad (3)$$

где C – удельное сцепление грунта, кПа; φ – угол внутреннего трения грунта, радиан; γ – удельный вес грунта, кН/м³; h – расстояние от основной площадки до расчетного горизонта, м.

При расчете следует принимать минимально возможные прочностные характеристики грунтов, соответствующие условиям их весеннего оттаивания.

Величину $P_{кр}$ следует определить для двух значений глубины расчетного горизонта: 0 и 1 м.

Затем необходимо построить график прямой линии $P_{кр} = f(h)$ – график изменения критической нагрузки по глубине для данного вида грунта.

Эту прямую линию проводят через две точки: $P_{кр} = f(h = 0)$ и $P_{кр} = f(h = 1)$.

Построить прямую необходимо на поле графика изменения нормальных напряжений в грунте $\sigma = f(h)$.

Графики $\sigma = f(h)$ рассчитаны и построены по программе Центрального научно-исследовательского института связи для четырех- и восьмиосных вагонов при нагрузке на ось 30 кН и приведены в [5].

На рис. 2 представлен график $\sigma = f(h)$ для четырехосных вагонов при перспективной нагрузке на ось 294 кН/ось (30 тс/ось). Представленный график далее используется в расчете.

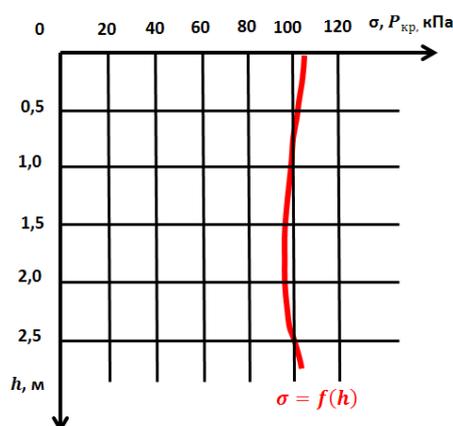


Рис. 2. График зависимости $\sigma = f(h)$ для четырехосных вагонов, принятый по СП 32-104-98
Fig. 2. Dependence graph $\sigma = f(h)$ for four-axle wagons, adopted according to the SR 32-104-98

В тестовом примере характеристики суглинистого грунта, из которого отсыпана насыпь приняты следующими:

– удельное сцепление грунта $C = 13,3$ кПа;

– угол внутреннего трения грунта $\varphi = 18^\circ = 0,314$ радиан;

– удельный вес грунта $\gamma = 19,4$ кН/м³.

Значения h – расстояние от основной площадки до рассматриваемого горизонта, принимались равными $h_0 = 0$ м, $h_1 = 1$ м.

По формуле (3) выполнен расчет:

$$P_{кр0} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{13,3}{\text{tg } 0,314} \right)}{\text{ctg } 0,314 + 0,314 - \frac{\pi}{2}} = 70,53 \text{ кПа;}$$

$$P_{кр1} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{13,3}{\operatorname{tg} 0,314} + 19,4 \cdot 1 \right)}{\operatorname{ctg} 0,314 + 0,314 - \frac{\pi}{2}} + 19,4 \cdot 1 = 123,34 \text{ кПа.}$$

По точкам пересечения суммарной кривой нормальных напряжений $\sigma = f(h)$ и прямой $P_{кр} = f(h)$ была определена минимально допустимая по условиям прочности подстилающих грунтов толщина защитного слоя $h_{з(проч)} = 0,65$ м (рис. 3).

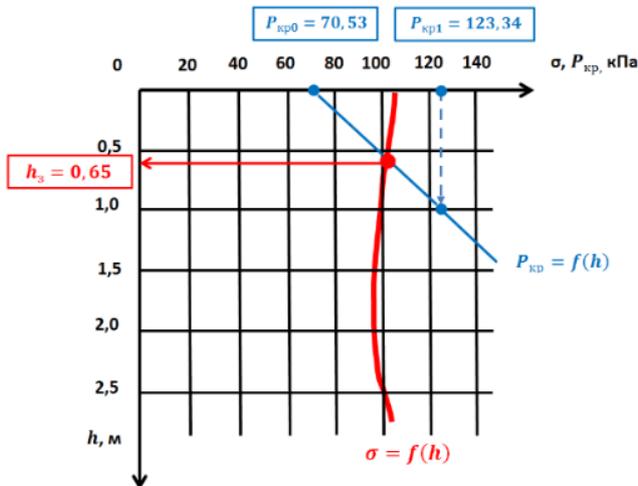


Рис. 3. Определение толщины защитного слоя $h_{з(проч)} = 0,65$ м минимально допустимой по условиям прочности подстилающих грунтов

Fig. 3. Determination of the thickness of the protective layer $h_{z(str)} = 0,65$ m, the minimum conditionally allowable strength of the underlying soils

Следовательно, необходимо принять наибольшее из двух определенных значений толщины защитного слоя:

$$h_{з(проект)} = \max \begin{cases} h_{з(пуч)} = 0,96 \text{ м} \\ h_{з(проч)} = 0,65 \text{ м} \end{cases} = 0,96 \text{ м.}$$

Таким образом, принимается проектное значение толщины подбалластного защитного слоя $h_{з(проект)} = 0,96$ м.

Автоматизация расчета толщины подбалластного защитного слоя

Для повышения эффективности и точности расчетов толщины подбалластного защитного слоя по методике, изложенной в СП 32-104-98, была разработана программа RASCHET_PZS.xlsx.

При автоматизации были поставлены и решены три задачи:

1. Выполнена аппроксимация графика зависимости толщины дренирующего слоя $H_{др} = f(f)$ при $\Omega = 1\ 830$ °С · сут. для метеостанции в Красноярске и при $\Omega = 2\ 364$ °С · сут. для метеостанции в Иркутске.

2. Выполнена аппроксимация графика $\sigma = f(h)$ – суммарной кривой нормальных напряжений для четырехосных вагонов при перспективной нагрузке на ось 294 кН/ось (30 тс/ось).

3. Разработана программа RASCHET_PZS.xlsx для расчета толщины подбалластного защитного слоя по методике, изложенной в СП 32-104-98, с полуавтоматическим и автоматическим поиском координаты $h_{з(проч)}$, м.

Рассмотрим решение перечисленных задач, иллюстрируя их скриншотами из программы RASCHET_PZS.xlsx.

Аппроксимация графика зависимости толщины дренирующего слоя выполнена для метеостанций, расположенных в Красноярске и Иркутске.

Значение Ω – многолетней средней суммы градусо-суток отрицательных температур наружного воздуха определено по СП 131.13330.2020 [36].

Аппроксимация выполнена полиномом шестой степени по десяти точкам, определенным по графику зависимости толщины дренирующего слоя $H_{др} = f(f)$, обеспечивающей непревышение допустимой величины пучения, равной $\Delta = 25$ мм для третьей категории проектируемой железной дороги.

Результаты аппроксимации размещены рядом с графиком и формулой аппроксимации (рис. 4).

Ниже приведены обе формулы $H_{др} = f(f)$:

1. Формула по Иркутску (ряд 1):

$$y = -8E-07 \cdot 6 + 6E-05 \cdot 5 - 0,002 \cdot 4 + 0,0344 \cdot 3 - 0,3273 \cdot 2 + 1,7145 \cdot (-1,7637)$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 1$.

2. Формула по Красноярску (ряд 2):

$$y = -3E-07 \cdot 6 + 2E-05 \cdot 5 - 0,0007 \cdot 4 + 0,0113 \cdot 3 - 0,1151 \cdot 2 + 0,7441 \cdot (-0,7087)$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 1$.

Аппроксимация облегчает поиск значения $h_{з(пуч)}$, так как вместо его определения вручную по графику $H_{др} = f(f)$ стало возможным автоматизировать расчет $H_{др}$ и других параметров.

Аппроксимация графика $\sigma = f(h)$ – сум-

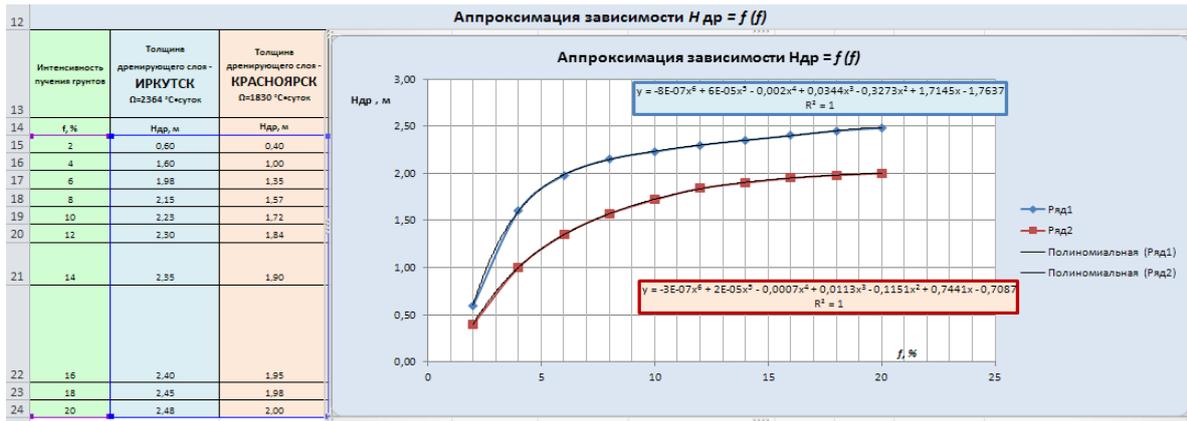


Рис. 4. Блок аппроксимации зависимости $H_{др} = f(f)$
 Fig. 4. The approximation block of the dependence $H_{др} = f(f)$

марной кривой нормальных напряжений для четырехосных вагонов при перспективной нагрузке на ось 294 кН/ось (30 т/ось) выполнена в отдельном блоке программы (рис. 5).

В результате аппроксимации была получена функция:

$$\sigma = -0,5466 \cdot h^6 + 3,6868 \cdot h^5 - 8,8585 \cdot h^4 + 11,4 \cdot h^3 - 10,056 \cdot h^2 - 0,135 \cdot h + 104,5$$

при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,9999$.

Аппроксимация функции $\sigma = f(h)$ потребовалась для того, чтобы в программе можно было решить третью задачу – разработать блоки полуавтоматического и автоматического поиска координаты $h_{з(проч)}$, м.

Координата точки $h_{з(проч)}$, равная минимально допустимой по условиям прочности подстилающих грунтов толщины защитного слоя, определяется как точка пересечения суммарной кривой нормальных напряжений $\sigma = f(h)$ и прямой $P_{кр} = f(h)$.

Эту координату в СП 32-104-98

рекомендуется определять вручную.

В программе RASCHET_PZS.xlsx предлагаются два варианта расчета: полуавтоматический и автоматический (рис. 6).

Координата точки $h_{з(проч)}$ определяется как точка пересечения функции

$$P_{кр} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{C}{\text{tg } \varphi} + \gamma \cdot h \right)}{\text{ctg } \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma \cdot h$$

и функции

$$\sigma = -0,5466 \cdot h^6 + 3,6868 \cdot h^5 - 8,8585 \cdot h^4 + 11,4 \cdot h^3 - 10,056 \cdot h^2 - 0,135 \cdot h + 104,5.$$

Для того чтобы решить поставленную задачу в MSExcel необходимо найти точку пересечения графиков. Далеко не всегда они будут пересекаться непосредственно на поле диаграммы. Но пользователю нужно показать те значения, в которых линии рассматриваемых явлений пересекаются.

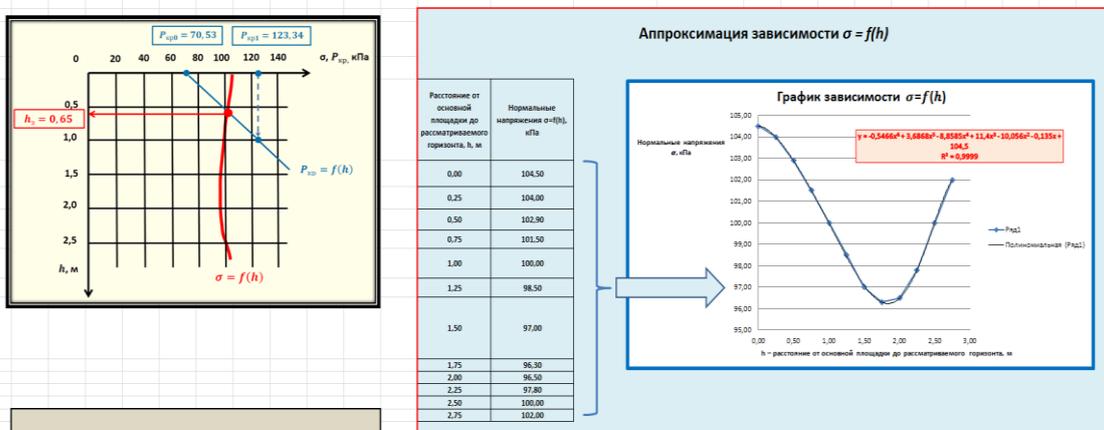


Рис. 5. Блок аппроксимации зависимости $\sigma = f(h)$
 Fig. 5. The approximation block of the dependence $\sigma = f(h)$

Полуавтоматический способ

Находим общую точку в рядах данных для указанных функций.

Сначала строим графики функций так, чтобы диапазон изменения абсциссы h был

небольшим, например, через 0,1 м.

Затем на графике визуально определяем точку пересечений и по таблице находим значение так, как показано на рис. 7.

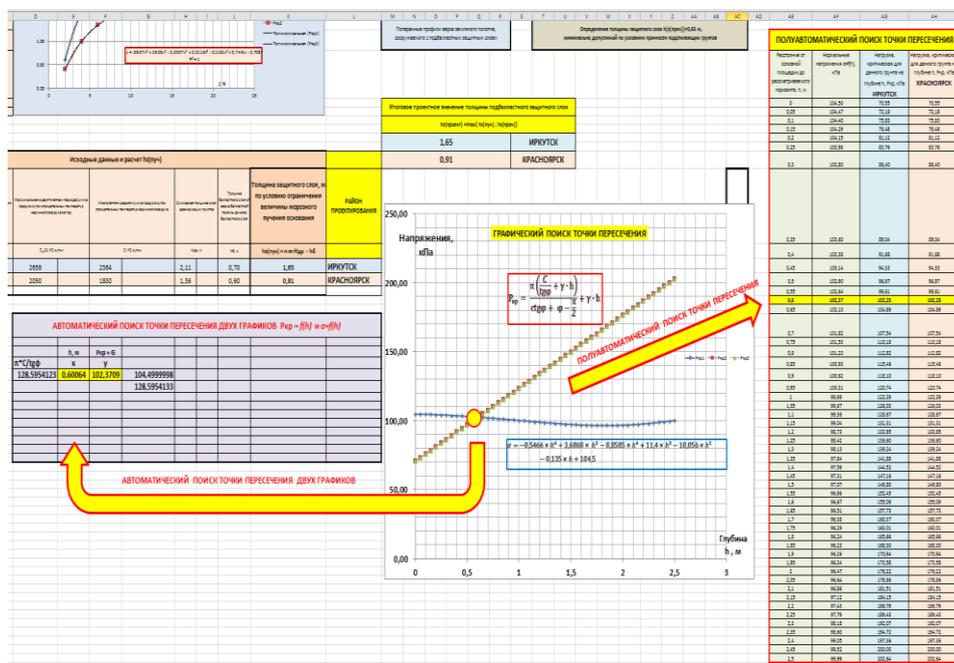


Рис. 6. Блоки полуавтоматического и автоматического поиска координаты $h_z(\text{проч})$
 Fig. 6. Blocks of semi-automatic and automatic search for coordinates $h_z(\text{str})$

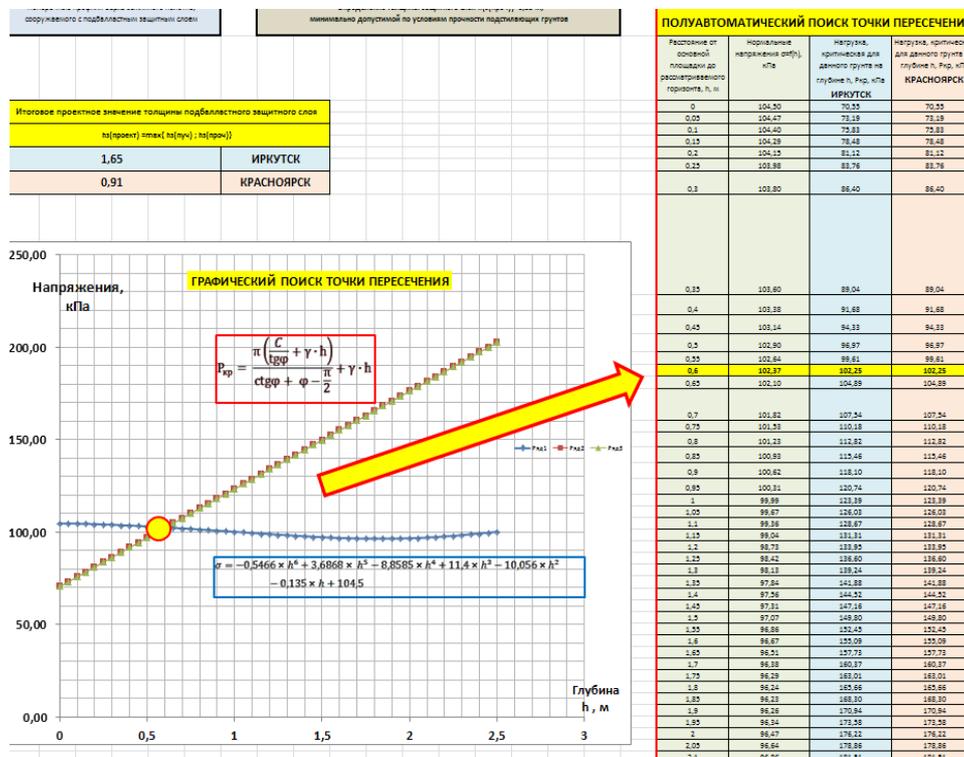


Рис. 7. Блок полуавтоматического поиска координаты $h_z(\text{проч})$
 Fig. 7. Semi-automatic coordinate search block $h_z(\text{str})$

Автоматический способ

Используем для решения уравнений специальный инструмент «Поиск решения». Кнопка вызова инструмента находится на вкладке «Данные». Если нет, то ее добавляют из надстроек Excel.

Преобразуем уравнения таким образом, чтобы неизвестные были в одной части. Далее для неизвестных x и y назначим ячейки в Excel.

Перепишем уравнения, используя ссылки на эти ячейки.

Вызываем меню «Поиск решения» и заполняем условия, необходимые для решения уравнений так, как это показано на рис. 8.

Нажимаем «Выполнить», и инструмент предлагает решение уравнений и дает необходимые пояснения (рис. 9).

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК ТОЧКИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ДВУХ ГРАФИКОВ $R_{кр} = f(h)$ и $\sigma = f(h)$			
	$h, \text{ м}$	$R_{кр} = \text{Б}$	
$\pi^2 C / \text{tg} \phi$	x	y	
128,5954123	0,60064	102,3709	104,4999998; 128,5954133

Параметры поиска решения

Оптимизировать целевую функцию: $\$G\41

До: Максимум Минимум Значения: 104,5

Изменяя ячейки переменных: $\$E\$11:\$F\11

В соответствии с ограничениями: $\$G\$42 = \$D\41

Сделать переменные без ограничений неотрицательными

Выберите метод решения: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ

Метод решения: Для гладких нелинейных задач используйте поиск решения нелинейных задач методом ОПГ, для линейных задач - поиск решения линейных задач симплекс-методом, а для негладких задач - эволюционный поиск решения.

Кнопки: Справка, Найти решение, Закрыть

Рис. 8. Заполнение условий поиска решения
Fig. 8. Filling in of the conditions for a solution search

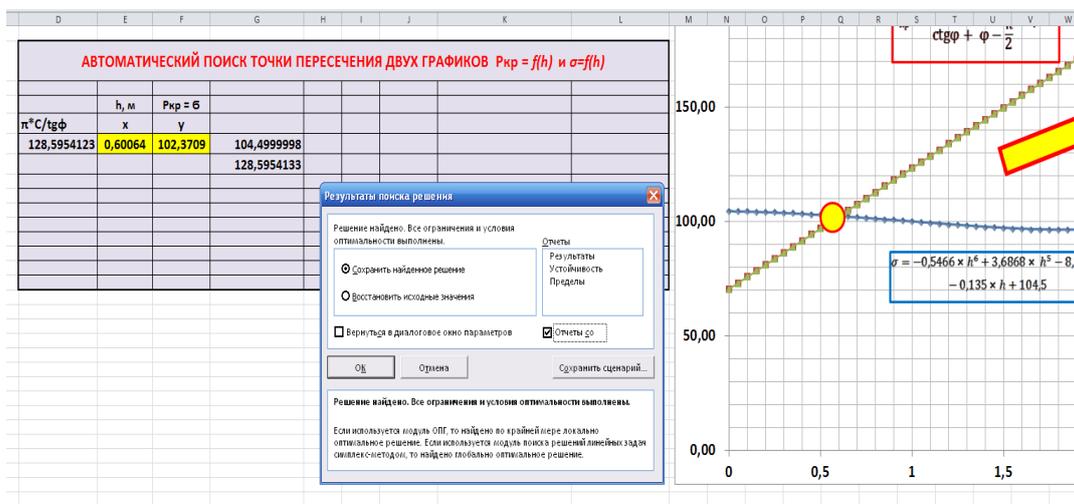


Рис. 9. Результат работы поиска решения
Fig. 9. The result of the search for a solution

Установленные значения для x и y совпадают с предыдущим решением, найденным с помощью составления рядов данных.

Сравним результаты ручного расчета, приведенного ранее:

$$h_{z(\text{проект})} = \max \begin{cases} h_{z(\text{пуч})} = 0,96 \text{ м} \\ h_{z(\text{проч})} = 0,65 \text{ м} \end{cases} = 0,96 \text{ м}$$

и результаты полуавтоматического и автоматического расчетов по программе –

$$h_{z(\text{проект})} = \max \begin{cases} h_{z(\text{пуч})} = 0,91 \text{ м} \\ h_{z(\text{проч})} = 0,60 \text{ м} \end{cases} = 0,91 \text{ м.}$$

Причиной расхождения является то, что значения вручную графически определяются неточно. Следует использовать результаты по программе и принять значение толщины защитного слоя для Иркутска $h_{z(\text{пуч})} = 1,65$ м, для Красноярска $h_{z(\text{пуч})} = 0,91$ м (рис. 10).

Итоговое проектное значение толщины подбалластного защитного слоя	
$h_{z(\text{проект})} = \max\{h_{z(\text{пуч})}; h_{z(\text{проч})}\}$	
1,65	ИРКУТСК
0,91	КРАСНОЯРСК

Рис. 10. Результаты расчетов $h_{z(\text{проект})}$

Fig. 10. Calculation results $h_{z(\text{project})}$

Следует также отметить, что толщина подбалластного защитного слоя в Иркутске должна быть больше $h_{z(\text{пуч})} = 1,65$ м по сравнению с такой же насыпью, сооружаемой из одинаковых глинистых грунтов, в Красноярске $h_{z(\text{пуч})} = 0,91$ м.

Причиной является значительное отличие в значениях Ω : для Иркутска $2\ 364$ °С · сут., для Красноярска – $1\ 830$ °С · сут.

В программе специально предусмотрены оба региона, чтобы можно было выполнять сравнения.

Проблемы при проектировании и внедрении конструкции подбалластного защитного слоя при реконструкции

По опыту работы авторов статьи над объектами реконструкции на БАМе (например, при проектировании двухпутной вставки на перегоне Заячий – Ларба) были установлены некоторые проблемы по внедрению конструкции подбалластного защитного слоя, которые приведены далее.

Ширина и глубина вырезки требуют

разборки части балластной призмы и верха земляного полотна под соседним эксплуатируемым путем, по которому осуществляется движение поездов, что приводит к дополнительным затратам, связанным с перерывами в движении поездов и последующим восстановлением положения действующего пути. Другим вариантом проектного решения является увеличение ширины земляного полотна по верху (вверху) не менее чем на 1,5 м, что нередко приводит к значительным строительным затратам, так как на большой протяженности участков реконструкции требуется разработка скальных грунтов на прижимах рек, либо отсыпка скальным грунтом в русло реки.

Путевые машинные комплексы по формированию подбалластного защитного слоя при реконструкции железнодорожного пути (отечественные и зарубежного производства) на железных дорогах Российской Федерации распространены пока еще не в достаточном количестве, по этой причине варианты проектных решений с глубокой вырезкой и устройством защитного слоя на глубине более 0,7 м с уплотнением без снятия рельсо-шпальной решетки нередко отвергаются заказчиком в проектах, несмотря на то, что их применение позволило бы реализовать передовую инновационную технологию.

Заключение

Проектирование строительства и реконструкции железных дорог выполняется вариантно.

При анализе используются технико-экономические показатели, одним из которых является потребность в дренирующих грунтах.

Автоматизация расчетов толщины подбалластного защитного слоя позволит проектировщикам определять объемы дренирующих грунтов по вариантам.

Показатель объема потребного дренирующего грунта и стоимости его доставки к участку строительства или реконструкции железной дороги в зависимости от удаленности разведанных карьеров в отдельных случаях является определяющим критерием при многокритериальной оптимизации множества альтернатив [37, 38] и при расчете показателей организационно-технологической надежности их строительства [39].

Список литературы

1. Ковенькин Д.А., Подвербный В.А. Этапы жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2015. № 3. С. 151–156.
2. Подвербный В.А., Казарина В.В., Подвербная О.В. Проектирование скоростного пассажирского рельсового транспорта иркутской агломерации // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2016. № 4. С. 308–326.
3. Проектирование трассы железной дороги на участке ВСЖД Гончарово – Слюдянка в программном комплексе INVEST / Е.О. Попова, О.Ю. Попов, В.А. Бучкин и др. // Проблемы и перспективы изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог : тр. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2009. Т. 1. С. 41–46.
4. СП 119.13330.2017 Железные дороги колеи 1520 мм (с изменением № 1 от 24.12.2019) : утв. приказом Минстроя РФ № 1648/пр от 12.12.2017 г. Введ. : 2018–06–13. М. : Минстрой России, 2017. 41 с.
5. СП 32-104-98 Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм : Одобрен Письмом Минземстроя РФ № 13-498 от 8.09.1998 г. Введ. : 1999–01–01. М. : Госстрой России, 1999. 160 с.
6. Об утверждении инструкции по устройству подбалластных защитных слоев при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути : распоряжение ОАО «РЖД» № 2544р от 12.12.2012. М. : ОАО «РЖД», 2012. 47 с.
7. Об утверждении и введении в действие технических условий на щебеночно-гравийно-песчаную смесь : распоряжение ОАО «РЖД» от 20.12.2012 г. № 2640р. М. : ОАО «РЖД», 2012. 15 с.
8. Временные технические условия на нормативы и методы определения модуля деформации подбалластного основания при реконструкции пути : утв. Департаментом пути и сооружений ОАО «РЖД» 30.11.2009. Доступ из справ.-прав. системы «АСПИЖТ» в локальной сети.
9. Методические рекомендации по проектированию земляного полотна железных дорог на пучинистых грунтах в суровых климатических условиях. М. : ЦНИИС, 1986. 49 с.
10. Ведомственные строительные нормы ВСН 61-89 Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты. М. : ЦНИИС, 1990. 189 с.
11. ЦПИ 24 Технические указания по устранению пучин и просадок железнодорожного пути. М. : Транспорт, 1998. 74 с.
12. Ашпиз Е.С., А.В. Замуховский. Обоснование нормативов деформативности подрельсового и подшпального оснований // Мир транспорта. 2012. № 5. С. 112–119.
13. Котова И.А., Чижов А.В., Юдин О.Г. Техничко-экономическое сравнение технологических вариантов устройства подбалластных защитных слоев с использованием объемной георешетки // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщ. 2017. № 1 (40). С. 36–45.
14. Казарина В.В., Подвербный В.А. Принятие решения по выбору варианта трассы железнодорожной линии // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 3 (82). С. 140–151.
15. Временные технические условия для опытного применения объемных георешеток Неовей при устройстве защитного подбалластного слоя. М. : ОАО «РЖД», 2009. 11 с.
16. Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии) : материалы науч.-практ. конф. / под ред. М. П. Клековкиной и др. СПб., 2019. 149 с.
17. Косенко С.А., Котова И.А., Акимов С.С. Техничко-экономическое обоснование устройства защитных подбалластных слоев из грунтобетона при тяжеловесном движении поездов // Вестн. Томск. гос. архитектур.-строит. ун-та. 2021. Т. 23. № 1. С. 161–174.
18. Акимов С.С., Косенко С.А. Ресайклинг как альтернативный способ повышения прочности подбалластного основания железнодорожного пути // Наука, образование, кадры : материалы нац. конф. в рамках IX Междунар. Сиб. трансп. форума. Новосибирск, 2019. С. 204–212.
19. Полевиченко, А.Г., Жданова С.М. Противодеформационные конструкции для стабилизации земляного полотна. Хабаровск : ДВГУПС, 2005. 82 с.
20. Анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна / Л.С. Блажко, С.Н. Чуян, В.Б. Захаров и др. // Известия ПГУПС. 2016. № 3. С. 328–336.
21. Путьевая машина АНМ 800R // auto-instructors.ru : сайт. URL: <https://auto-instructors.ru/articles/putevaya-mashina-ahm-800r> (Дата обращения: 16.05.2022).
22. Машины для укладки ПЗС // Группа ПТК АО «Тулажелдормаш» : сайт. URL: <https://www.tulazdm.ru/mr-100> (Дата обращения 16.05.2022).
23. ООО «ИнфраТех» - передовые решения при строительстве и ремонте // Евразия Вести : сайт. URL: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2010-08a19> (Дата обращения: 16.05.2022).
24. Применение комплекса по формированию защитного подбалластного слоя (ЩОМ-2000, МР-100) при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути на сети железных дорог Российской Федерации : технология ОАО «РЖД» от 06.07.2016 № 447. М. : ОАО «РЖД», 2016. 48 с.
25. Дудкин Е.П., Петряев А.В. Влияние подбалластных матов на величину упругих деформаций пути // Путь и путьевое хозяйство. 2022. № 7. С. 16–18.
26. Петряев А.В., Парамонов В.Н. Расчетный анализ поведения подшпального основания при его стабилизации геосинтетическими материалами // Транспорт Урала. 2022. № 1 (72). С. 62–67.
27. Третьяков В.В. Влияние характеристик подбалластного основания на интенсивность накопления расстройств пути в вертикальной плоскости : дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 163 с.
28. Акашов А.Н. Конструктивно-технологические и организационные решения по повышению стабильности геометрии рельсовой колеи на участках обращения поездов повышенного веса и длины : дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2010. 134 с.

29. Морозова А.А. Несущая способность подшпального основания железнодорожного пути на участках обращения поездов с осевыми нагрузками до 300 кН : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2014. 184 с.
30. Experimental study on the compaction characteristics and evaluation method of coarse-grained materials for subgrade / S. Li, Y. Ye; L. Tang et al. // *Materials* 2021. 14 (22). 6972. DOI 10.3390/ma14226972.
31. Le T.H.M., Lee S.-H., Park D.-W. Evaluation on full-scale testbed performance of cement asphalt mortar for ballasted track stabilization // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 254. P. 119249.
32. Saygili A., Dayan M. Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 161. Pp. 107–114.
33. Comparison and evaluation of railway subgrade quality detection methods / R. Nie, W. Leng, Q. Yang et al. // *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2016. Vol. 232. № 2. Pp. 356–368.
34. Vibration response characteristics and application of existing railway subgrade / Zh. Junyun, H. Zhuoling, Ch. Siyuan et al. // *Hindawi // Shock and vibration*. 2021. Vol. 5/28. 10 p. DOI 10.1155/2021/9926980.
35. Experimental study on the dynamic features of cement-stabilized expansive soil as subgrade filling of heavy haul railway / Y. Shang, L. Xu, Y. Zhao et al. // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2017. Vol. 10. № 6. P. 136.
36. СП 131.13330.2020 Строительная климатология : утв. приказом Минстроя РФ № 859/пр от 24.12.2020. Введ. : 2021–06–25. М. : Минстрой России, 2020. 146 с.
37. Многокритериальная оптимизация множества вариантов железной дороги методом идеальной точки / А.В. Гавриленков, Ю.А. Быков, В.А. Подвербный и др. // *Транспортное строительство*. 1992. № 6. С. 10–11.
38. Подвербный В.А., Ковенькин Д.А., Филатов Е.В. Проектные решения по ликвидации большого места земляного полотна в проекте модернизации железнодорожного пути // *Наука и образование транспорту*. 2016. № 2. С. 181–185.
39. Симонова О.А., Гнездилова О.А. Оценка надежности календарного графика строительства моста // *Молодая наука Сибири*. 2021. № 1 (11). С. 272–276.

References

1. Koven'kin, D.A., Podverbnyi V.A. Etapy zhiznennogo tsikla verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti [Stages of the life cycle of the upper structure of the railway track]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog* [Designing the development of the regional railway network], 2015, no. 3, pp. 151–156.
2. Podverbnyi V.A., Kazarina V.V., Podverbnyaya O.V. Proektirovanie skorostnogo passazhirskogo rel'sovogo transporta irkutskoi aglomeratsii [Designing high-speed passenger rail transport of the Irkutsk agglomeration]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog* [Designing the development of the regional railway network], 2016, no. 4, pp. 308–326.
3. Popova E.O., Popov O.Y., Buchkin V.A., Podverbnyi V.A., Podverbnyaya O.V. Proektirovanie trassy zheleznoi dorogi na uchastke VSZHD Goncharovo – Slyudyanka v programmom komplekse INVEST [Designing the railway route on the Goncharovo – Slyudyanka section of the East-Siberian Railway in the INVEST software package]. *Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Problemy i perspektivy izyskaniy, proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznykh dorog»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation «Problems and prospects of research, design, construction and operation of railways»]. Irkutsk, 2009, vol. 1, pp. 41–46.
4. SP 119.13330.2017 Zheleznye dorogi kolei 1520 mm. (s izmeneniyem no 1 ot 24.12.2019) [Set of Rules no 119.13330.2017 Railway with 1520 mm track (with edit no 1 dated December 24, 2019)]. Moscow: Minstroy Publ., 2017. 41 p.
5. SP 32-104-98 Proektirovanie zemlyanogo polotna zheleznykh dorog kolei 1520 mm [Set of rules no 32-104-98 Design of earthenwork for rail ways with 1520 mm track]. Moscow: Gosstroy Rossii Publ., 1999. 160 p.
6. Rasporyazhenie OAO «RZHD» no 2544r ot 12.12.2012 «Ob utverzhdenii instruksii po ustroystvu podballastnykh zashchitnykh sloev pri rekonstruktsii (modernizatsii) zheleznodorozhnogo puti» [Order of JSC «Russian Railways» no 2544r dated December 12, 2012 «About approval Instructions for the installation of sub-ballast protective layers during the reconstruction (modernization) of the railway track»]. Moscow: RZHD, 2012. 47 p.
7. Rasporyazhenie OAO «RZHD» ot 20.12.2012 no 2640r «Ob utverzhdenii i vvedenii v deystvie tekhnicheskikh uslovii na shchebenochno-graviino-peschanuyu smes' [Order of JSC «Russian Railways» dated December 20, 2012 no 2640r «On approval and introduction of technical conditions for crushed stone-gravel-sand mixture»]. Moscow: RZHD Publ., 2012. 15 p.
8. Vremennyye tekhnicheskyye usloviya na normativy i metody opredeleniya modulya deformatsii podballastnogo osnovaniya pri rekonstruktsii puti: utverzhdeny Departamentom puti i sooruzheniy OAO «RZHD» 30.11.2009 [Temporary technical conditions for standards and methods for determining the deformation modulus of the substructure during the reconstruction of the track: approved by Department of Track and Constructions of JSC «Russian Railways» dated November 30, 2009].
9. Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu zemlyanogo polotna zheleznykh dorog na puchinykh gruntakh v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [Methodological recommendations for the design of the railway roadbed on heaving soils in harsh climatic conditions]. Moscow: TSNIIS Publ., 1986. 49 p.
10. Vedomstvennyye stroitel'nye normy VSN 61-89 Izyskaniya, proektirovanie i stroitel'stvo zheleznykh dorog v raionakh vечноy merzloty [Departmental building codes VSN 61-89 Surveys, design and construction of railways in permafrost areas]. Moscow: TSNIIS Publ., 1990. 189 p.
11. TSPI 24 Tekhnicheskyye ukazaniya po ustraneniyu puchiny i prosadki zheleznodorozhnogo puti [TSPI 24 Technical instructions for the elimination of depths and subsidence of the railway track]. Moscow: Transport Publ., 1998. 74 p.
12. Ashpiz E.S., Zamukhovskii A.V. Obosnovanie normativov deformativnosti podrel'sovogo i podshpal'nogo osnovaniy [Substantiation of the standards of deformability of the under-rail and under-sleeper bases]. *Mir transporta* [The World of Transport], 2012, no. 5, pp. 112–119.
13. Kotova I.A., Chizhov A.V., Yudin O.G. Tekhniko-ekonomicheskoe sravnenie tekhnologicheskikh variantov ustroystva

podballastnykh zashchitnykh sloev s ispol'zovaniem ob''emnoi georeshetki [Technical and economic comparison of technological options for the device of sub-ballast protective layers using a volumetric geogrid]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2017, no. 1 (40), pp. 36–45.

14. Kazarina V.V., Podverbnyi V.A. Prinyatie resheniya po vyboru varianta trassy zheleznodorozhnoi linii [Decision-making on the choice of the route of the railway line]. *Mir transporta* [The world of transport], 2019, vol. 17, no 3 (82), pp. 140–151.

15. Vremennye tekhnicheskie usloviya dlya opytnogo primeneniya ob''emnykh georeshetok Neoveb pri ustroistve zashchitnogo podballastnogo sloya [Temporary technical conditions for the experimental use of volumetric geogrid Neoveb in the device of a protective ballast layer]. Moscow: RZHD Publ., 2009. 11 p.

16. Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Innovatsii i dolgovechnost' ob''ektov transportnoi infrastruktury (materialy, konstruksii, tekhnologii)» [Proceedings of the scientific and practical conference «Innovation and durability of transport infrastructure facilities (materials, structures, technologies)»]. Saint-Petersburg, 2019. 149 p.

17. Kosenko S.A., Kotova I.A., Akimov S.S. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie ustroistva zashchitnykh podballastnykh sloev iz gruntobetona pri tyazhelovesnom dvizhenii poezdov [Feasibility study of the device of protective sub-ballast layers of ground concrete during heavy train traffic]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering], 2021, vol. 23, no. 1, pp. 161–174.

18. Akimov S.S., Kosenko S.A. Resaikling kak al'ternativnyi sposob povysheniya prochnosti podballastnogo osnovaniya zheleznodorozhnogo puti [Recycling as an alternative way to increase the strength of the substructure of the railway track]. *Materialy nauchnoi konferentsii «Nauka, obrazovanie, kadry» v ramkah IX Mezhdunarodnogo Sibirskogo transportnogo foruma* [Proceedings of the National Conference «Science, education, personnel» within the framework of the IX International Siberian Transport Forum]. Novosibirsk, 2019, pp. 204–212.

19. Polevichenko, A.G., Zhdanova S.M. Protivodeformatsionnye konstruksii dlya stabilizatsii zemlyanogo polotna [Anti-deformation structures for the stabilization of the roadbed], Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2005. 82 p.

20. Blazhko L. S., Chuyan S.N., Zakharov V.B., Chernyaev E.V. Analiz sposobov povysheniya nesushchei sposobnosti gruntov osnovnoi ploshchadki zemlyanogo polotna [Analysis of ways to increase the bearing capacity of soils of the main site of the roadbed]. *Izvestiya PGUPS* [Bulletins of Petersburg State Transport University], 2016, no. 3, pp. 328–336.

21. Putevaya mashina AHM 800R (Elektronnyi resurs) [Track machine AHM 800R (Electronic resource)]. Available at: <https://auto-instructors.ru/articles/putevaya-mashina-ahm-800r> (Accessed May 16, 2022).

22. Mashiny dlya ukladki PZS (Elektronnyi resurs) [Sub-ballast protective layer stacking machines (Electronic resource)]. Available at: <https://www.tulazdm.ru/mr-100> (Accessed May 16, 2022).

23. ООО «InfraTekh» – передовые resheniya pri stroitel'stve i remonte (Elektronnyi resurs) [InfraTech LLC – advanced solutions in construction and repair (Electronic resource)]. Available at: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2010-08a19> (Accessed May 16, 2022).

24. Tekhnologiya OAO «RZHD» ot 06.07.2016 no 447 «Primenenie kompleksa po formirovaniyu zashchitnogo podballastnogo sloya (SHCHOM-2000, MR-100) pri rekonstruksii (modernizatsii) zheleznodorozhnogo puti na seti zheleznykh dorog Rossiiskoi Federatsii. [Technology of JSC «Russian Railways» dated July 6, 2016 no 447 «The use of a complex for the formation of a protective sub-ballast layer (SHOM-2000, MR-100) during the reconstruction (modernization) of a railway track on the railway network of the Russian Federation»]. Moscow: RZHD Publ., 2016. 48 p.

25. Dudkin, E.P., Petryaev A.V. Vliyaniye podballastnykh matov na velichinu uprugikh deformatsii puti [The influence of sub-ballast mats on the magnitude of elastic deformations of the track]. *Put' i putevoe hozyaystvo* [Track and track facilities], 2022, no. 7, pp. 16–18.

26. Petryaev A.V., Paramonov V.N. Rashchetnyi analiz povedeniya podshpal'nogo osnovaniya pri ego stabilizatsii geosinteticheskimi materialami [Computational analysis of the behavior of the subshell base during its stabilization by geosynthetic materials]. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2022, no. 1 (72), pp. 62–67.

27. Tretyakov V. V. Vliyaniye kharakteristik podballastnogo osnovaniya na intensivnost' nakopleniya rasstroistv puti v vertikal'noi ploskosti [The influence of the characteristics of the subcellular base on the intensity of accumulation of path disorders in the vertical plane]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2008. 163 p.

28. Akashov A.N. Konstruktivno-tekhnologicheskie i organizatsionnye resheniya po povysheniyu stabil'nosti geometrii rel'sovoi kolei na uchastkakh obrashcheniya poezdov povyshennogo vesa i dliny [Constructive, technological and organizational solutions to improve the stability of the geometry of the rail track in the areas of circulation of trains of increased weight and length]. Ph.D.'s thesis. Moscow, 2010. 134 p.

29. Morozova A.A. Nesushchaya sposobnost' podshpal'nogo osnovaniya zheleznodorozhnogo puti na uchastkakh obrashcheniya poezdov s osevyimi nagruzkami do 300 kN [Bearing capacity of the base of the railway track on the sections of trains with axial loads up to 300 kN]. Ph.D.'s thesis. Saint-Petersburg, 2014. 184 p.

30. Li S., Ye Y., Tang L. et al. Experimental study on the compaction characteristics and evaluation method of coarse-grained materials for subgrade. *Materials* 2021. 14 (22). 6972. DOI 10.3390/ma14226972.

31. Le T.H.M., Lee S.-H., Park D.-W. Evaluation on full-scale testbed performance of cement asphalt mortar for ballasted track stabilization. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 254, 119249.

32. Saygili A., Dayan M. Freeze-thaw behavior of lime stabilized clay reinforced with silica fume and synthetic fibers. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, vol. 161, pp. 107–114.

33. Nie R., Leng W., Yang Q. et al. Comparison and evaluation of railway subgrade quality detection methods. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, vol. 232, no. 2, pp. 356–368.

34. Junyun Zh., Zhuoling H., Siyuan Ch. et al. Vibration response characteristics and application of existing railway subgrade. *Hindawi. Shock and vibration*, 2021, vol. 5/28. 10 p. DOI 10.1155/2021/9926980.

35. Shang Y., Xu L., Zhao Y. et al. Experimental study on the dynamic features of cement-stabilized expansive soil as

subgrade filling of heavy haul railway. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2017, vol. 10, no. 6, 136.

36. SP 131.13330.2020 Stroitel'naya klimatologiya [Set of Rules no 131.13330.2020 Building climatology]. Moscow: Minstroy Publ., 2020. 146 p.

37. Gavrilin A.V., Bykov Yu.A., Podverbnyi V.A., Shivareva E.A. Mnogokriterial'naya optimizatsiya mnozhestva variantov zheleznoi dorogi metodom ideal'noi tochki [Multicriteria optimization of a set of railway options by the ideal point method]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], 1992, no. 6, pp. 10–11.

38. Podverbnyi V.A., Koven'kin D.A., Filatov E.V. Proektnye resheniya po likvidatsii bol'nogo mesta zemlyanogo polotna v proekte modernizatsii zheleznodorozhnogo puti [Design solutions for the elimination of the sore spot of the roadbed in the railway modernization project]. *Nauka i obrazovanie transportu* [Science and education for transport], 2016, no. 2, pp. 181–185.

39. Simonova O.A., Gnezdilova O.A. Otsenka nadezhnosti kalendarnogo grafika stroitel'stva mosta [Assessment of the reliability of the calendar schedule for the construction of the bridge]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2021, no. 1 (11), pp. 272–276.

Информация об авторах

Подвербный Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: vpodverbnyi@mail.ru.

Титов Константин Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: forestgamping@mail.ru.

Холодов Пётр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: petruha_yy@mail.ru.

Гнездилова Ольга Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства железных дорог, мостов и тоннелей, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: olangnez@mail.ru.

Information about the authors

Vyacheslav A. Podverbnyi, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: vpodverbnyi@mail.ru.

Konstantin M. Titov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Head of the Department of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: forestgamping@mail.ru.

Petr N. Kholodov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: petruha_yy@mail.ru.

Ol'ga A. Gnezdilova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Building of Railways, Bridges and Tunnels, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail : olangnez@mail.ru.