

Реконструкция участка железной дороги с целью увеличения скоростей движения поездов

Т. А. Дубровская, А. В. Тавтын✉

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

✉ tavtyn98@mail.ru

Резюме

Освоение растущего грузооборота вызывает необходимость увеличения пропускной способности железнодорожных линий. Это увеличение, определяемое как разница между потребной и наличной пропускной способностью, может быть достигнуто за счет организационно-технических и реконструктивных мероприятий. К организационно-техническим относятся мероприятия, направленные на использование резервов пропускной способности и потому не требующие значительных расходов. В результате увеличиваются масса и скорость движения поездов, уменьшаются станционные интервалы, ускоряется обработка поездов и сокращается их стоянка на станциях. Реконструктивные мероприятия связаны с применением новой техники и выполнением строительных работ, что требует значительных капитальных затрат. Реконструкцию железных дорог проводят поэтапно в наиболее целесообразной последовательности, что позволяет снизить капитальные затраты и расходы на перевозки. Для обеспечения потребной пропускной способности железнодорожной линии выбирают наиболее рациональные организационно-технические и реконструктивные мероприятия на основе технико-экономического сравнения вариантов. При разработке проекта реконструкции существующей железной дороги решают следующие задачи: оптимизация положения трассы в плане и профиле; выбор элементов технического оснащения линии, в частности типа локомотива; назначение путей увеличения провозной способности железной дороги. Для того чтобы решить эти и другие задачи проектирования железных дорог, используются алгоритмические методы, позволяющие определить массу поезда при известном продольном профиле и заданном локомотиве, скорость движения и время хода поезда, расход электрической энергии при электрической тяге или дизельного топлива при тепловозной тяге. Такие методы объединяются общим названием – тяговые расчеты, которые базируются на общих положениях науки о тяге поездов.

Ключевые слова

железная дорога, реконструкция железной дороги, пропускная и провозная способности дороги, железнодорожные перевозки, организационно-технические мероприятия, реконструктивные мероприятия, тяговые расчеты

Для цитирования

Дубровская Т. А. Реконструкция участка железной дороги с целью увеличения скоростей движения поездов / Т. А. Дубровская, А. В. Тавтын // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 64–74. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).64-74

Информация о статье

поступила в редакцию: 17.01.2022 г.; поступила после рецензирования: 24.03.2022 г.; принята к публикации: 25.03.2022 г.

Reconstruction of a section of the railway in order to increase the speed of trains

T. A. Dubrovskaya, A. V. Tavtyn✉

Belarusian State University of Transport, Gomel, the Republic of Belarus

✉ tavtyn98@mail.ru

Abstract

The development of the growing freight turnover necessitates an increase in the carrying capacity of railway lines. Defined as the difference between the required and available carrying capacity, this can be achieved through organizational, technical and reconstruction measures. Organizational and technical measures include those aimed at using the reserves of carrying capacity and therefore not requiring significant costs. As a result, the mass and speed of train movement increases, station intervals decrease, the processing of trains is accelerated with their parking time at stations is reduced. Reconstruction activities are associated with the use of new equipment and construction work, which requires significant capital expenditures. Reconstruction of railways is carried out by stages in the most appropriate order, which reduces capital and transportation costs. To ensure the required throughput of the railway line, the most rational organizational, technical and reconstruction measures are selected on the basis of a technical and economic comparison of options. When developing a project design for the reconstruction of an existing railway, the following tasks are solved: optimization of the route position in plan and profile; choice of the technical equipment elements of the line, in particular; outlining the ways to increase the carrying capacity of the railway. In order to solve

these and other problems of the design of railways, algorithmic methods are used to determine the mass of a train with a known longitudinal profile and a given locomotive, the speed and travel time of the train, the consumption of electrical energy for electric traction or diesel fuel for diesel traction. Such methods are called by general name of traction calculations, which are based on the general provisions of the train traction science.

Keywords

railway, railway reconstruction, capacity and carrying capacity of the road, railway transportation, organizational and technical measures, reconstructive measures, traction calculations

For citation

Dubrovskaya T. A., Tavtyn A. V. Rekonstruktsiya uchastka zheleznoi dorogi s tsel'yu uvelicheniya skorostei dvizheniya poezdov [Reconstruction of a section of the railway in order to increase the speed of trains]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2022, No.1(73), pp. 64–74. – DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).64-74

Article Info

Received: 17.01.2022; revised: 24.03.2022; accepted: 25.03.2022.

Введение

Реконструкцию железных дорог проводят поэтапно в наиболее целесообразной последовательности, что позволяет снизить капитальные затраты и расходы на перевозки. Для обеспечения потребной пропускной способности железнодорожной линии выбирают наиболее рациональные организационно-технические и реконструктивные мероприятия на основе технико-экономического сравнения вариантов [1].

Республика Беларусь благодаря своему географическому расположению является неотъемлемым звеном в грузовых перевозках по маршруту Китай – Европа – Китай. В последние годы на Белорусской железной дороге прилагаются большие усилия для ее модернизации и обновления тягового подвижного состава, что повышает уровень организации перевозок и их эффективность и, соответственно, способствует значительному увеличению объема транзитных перевозок [2].

Растущие объемы перевозок требуют постоянного увеличения пропускной и провозной способностей дороги. Загрузка основных направлений от общей протяженности дорог, отсутствие делений на основные специализации линий, отсутствие ряда электрифицированных участков, сезонная неравномерность перевозок – все это снижает пропускную и провозную способности Белорусской железной дороги.

В Беларуси провозная способность является главным показателем производительности железной дороги [3]. Увеличить провозную способность по грузовому движению можно двумя путями: повысить массу состава поезда или пропускную способность дороги. Число перевозимых пассажиров можно увеличить,

добавив количество вагонов в поездах или повысив скорость движения.

Вообще нет однозначного понятия пропускной и провозной способностей [4]. В Германии пропускная способность есть ни что иное как возможность участка пропускать количество поездов за единицу времени [5]. В Дании это уже способность инфраструктуры пропускать определенное количество поездов при соблюдении графика движения [6].

Мероприятия по увеличению пропускной и провозной способностей тесно связаны с усилением мощности железных дорог и подразделяются на организационно-технические и реконструктивные мероприятия (рис. 1) [7].

Реконструктивные мероприятия наиболее дорогой вариант усиления мощности дороги. К ним можно отнести строительство дополнительных путей (второй, третий т. д.), электрификацию, удлинение приемоотправочных путей, строительство двухпутных вставок и т.д.

Увеличение пропускной и провозной способностей с помощью организационно-технических мероприятий – не такой затратный вариант, как реконструкция, и состоит в том, чтобы использовать внутренние ресурсы существующей железнодорожной линии: сокращение или отмену стоянок, изменение размера тяговых плеч [8]. В результате таких мероприятий увеличиваются скорость движения поездов, уменьшаются станционные интервалы, ускоряется обработка поездов и сокращается их стоянка на станциях.

Все это позволяет усилить линию за счет более эффективного использования технических устройств без значительных капитальных вложений и за сравнительно короткий срок.



Рис. 1. Мероприятия по увеличению наличной пропускной способности

Fig.1. Measures to increase the existing carrying capacity

Для этого требуется больше затрачиваемых ресурсов, однако их использование позволяет резко увеличить количество пропускаемых поездов за сутки [9].

Целью данной статьи является оптимизация профиля пути на участке Белорусской железной дороги с помощью тяговых расчетов.

Пути увеличения пропускной и провозной способностей

При разработке реконструктивных мер по увеличению пропускной и провозной способностей существующей железной дороги решаются следующие задачи:

- оптимизация положения трассы в плане и профиле;
- выбор элементов технического оснащения линии, в частности тип локомотива;
- назначение путей увеличения провозной и пропускной способностей железной дороги [1].

Оптимизация положения пути в плане заключается в реконструкции плана линии с увеличением радиусов криволинейных участков пути, так как кривые малых радиусов сдерживают скорости движения поездов. Однако не всегда есть возможность это выполнить, так как существующие пути и развитая инфраструктура

в данном случае препятствует этому мероприятию.

Для увеличения скоростей движения, а, следовательно, и пропускной способности поездов допустимая разность уклонов (Δi) в профиле не должна превышать 6 ‰ ($\Delta i \leq 6 \text{ ‰}$) [10]. Если разность уклонов превышает нормативное значение, этот уклон спрямляется и проводится проверка путем тягового расчета, только после этого на участке проводится реконструкция пути.

Тип локомотива играет не последнюю роль в решении задачи по увеличению пропускной и провозной способностей дороги.

Эксплуатация мощных локомотивов позволила формировать поезда с увеличением их среднего веса и длины, что создает предпосылки для снижения себестоимости перевозок и повышения интереса к ним у грузовладельцев, особенно в сфере транзитных контейнерных перевозок [11].

Задействованные на важнейших направлениях перевозок современные электропоезда стали воплощением инновационных решений, призванных вывести Белорусскую стальную магистраль на новый уровень развития [12].

На железных дорогах Беларуси применяются тепловозная и электрическая тяги. При этом наибольшее распространение получили

электровозы переменного тока и тепловозы с электрической передачей (тяговыми электродвигателями) [13].

Важным шагом по обновлению парка грузовых локомотивов является приобретение Белорусской железной дорогой электровозов переменного тока БКГ1 и БКГ2, производимых компанией CRRC Datong Co., Ltd. (Китай) (рис. 2) [2].



Рис. 2. Электровоз БКГ1-012
Fig.2. Electric locomotive BKГ1-012

Электровозы были разработаны с учётом особенностей эксплуатации на территории Республики Беларусь. Для электровоза БКГ1 в марте 2013 г был получен сертификат Нацио-

нальной системы подтверждения соответствия Республики Беларусь, а в июне 2017 г. для электровоза БКГ2 получен сертификат Евразийского экономического союза ЕАЭС. В электровозах БКГ1 и БКГ2 75 % оборудования является взаимозаменяемым, что снижает затраты на их обслуживание и ремонт [2]. Заявленная мощность локомотива – 9 000 т.

Для назначения путей увеличения провозной способности железной дороги производится анализ участка, затем принимается окончательный вариант мероприятий, позволяющих увеличить пропускную и провозную способности дороги.

Для реализации повышения пропускной и провозной способностей применяется программный комплекс «ЭРА» (интегрированная система расчетов и анализа движения поездов, созданная в Дальневосточном государственном университете путей сообщения в 2010 г. В.А. Анисимовым и В.В. Анисимовым), позволяющий рассчитать массу состава, время хода и скорость.

На Белорусской железной дороге используются классические тяговые расчеты, дающие возможность анализировать все необходимые мероприятия для выбора окончательного варианта по повышению пропускной способности участка.

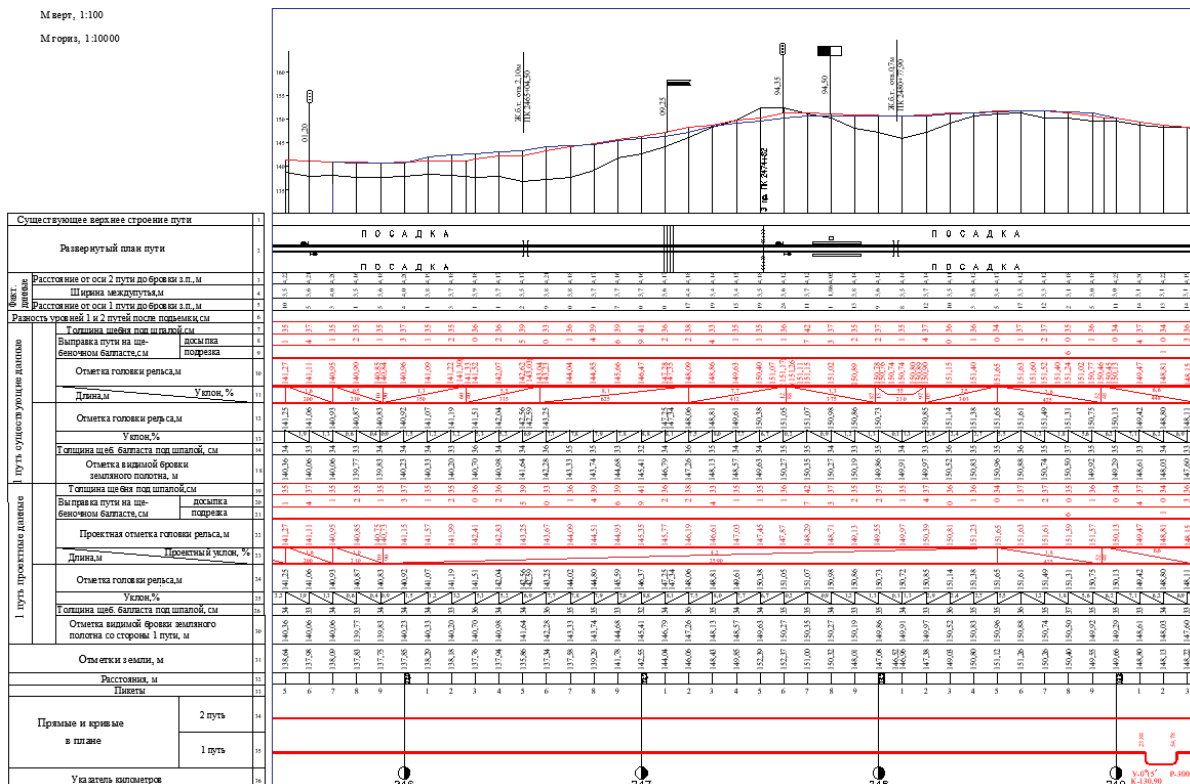


Рис. 3. Реконструируемый продольный профиль для грузового состава
Fig.3. Freight train longitudinal profile under reconstruction

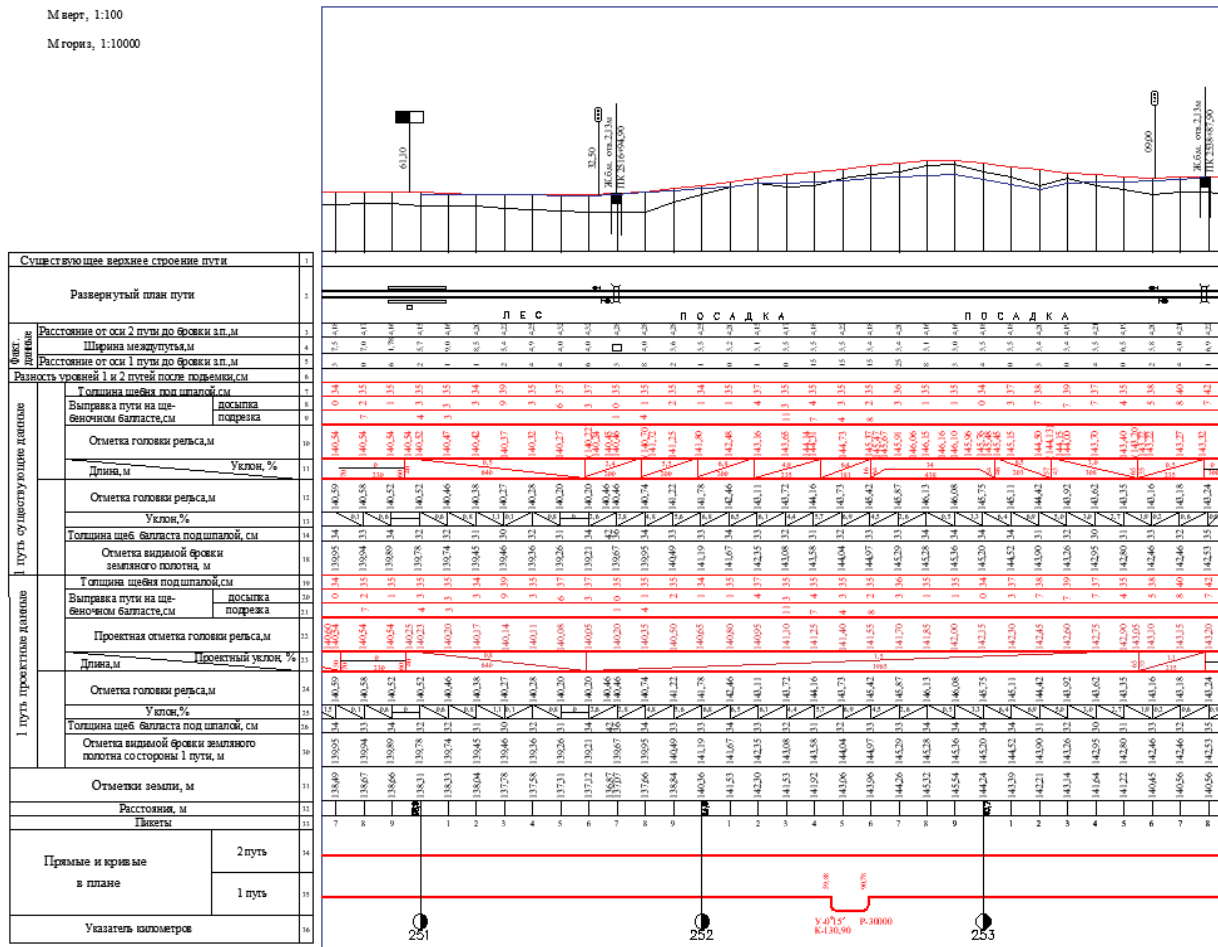


Рис. 4. Реконструируемый продольный профиль для пассажирского состава
 Fig.4. Passenger train longitudinal profile under reconstruction

Пример расчета на участке железной дороги

Для оценки назначенных мероприятий по увеличению пропускной и провозной способностей железной дороги [14] рассмотрим участок Белорусской железной дороги (ПК246–ПК260) с разрешенной скоростью движения 140/80 км/ч [15].

Разность уклонов продольного профиля пути практически на всех пикетах (за исключением ПК247+60,00 и ПК252+80,00) соответствует современным нормативным требованиям ($\Delta i \leq 6\%$). На ПК247+60,00 $\Delta i = 9\%$, а на ПК252+80,00 $\Delta i = 12,9\%$, что больше нормативного значения, т. е. на направлении существуют участки профиля, которые будут ограничивать скорости, а значит и пропускную способность. Данные интервалы нуждаются в перепроектировании с помощью более пологих уклонов (ПК247+60,00 и соседние участки уложили уклоном 4,2‰; ПК252+80,00 и соседние участки – 1,5‰) (рис.3, 4). Рисунок суще-

ствующего и реконструируемого профиля выполнены с помощью двухмерной системы автоматизированного проектирования AutoCAD.

После этого на всем участке разность соседних уклонов соответствует нормативным требованиям ($\Delta i \leq 6\%$). Проверим с помощью тяговых расчетов, можно ли на данном участке повысить скорости движения пассажирских поездов до 160 км/ч, а грузовых – до 100 км/ч. Это можно сделать, применив новые типы локомотивов БКГ1-012 для грузового движения и электропоезда серии ЭП^М (Stadler) для пассажирского движения.

Проверим возможность увеличения провозной способности грузового подвижного состава с помощью тяговых расчетов [16].

Исходные данные: локомотив БКГ1-012; масса локомотива $P=200$ т; масса состава с платформами 13-491 3500 т; длина поезда ≈ 680 м; ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с²; средняя нагрузка на ось груженого вагона q_{04}

= 25,0 т; конструкционная скорость – 120 км/ч; сила тяги при трогании: $F_{кр} = 774980$ Н; спрямленный максимальный уклон: $i_c = (1,5 \cdot 113,65 + 0,285 + 0,280) / 680 = 0,25\%$; радиус кривой: $R = 20000$ м; длина кривой: $S_{кр} = 133,81$ м.

Определение силы тяги при $V_p = 100$ км/ч

Касательная сила тяги электровоза при скорости 100 км/ч определяется по формуле:

$$F_{кр} = g(367\eta N)/V_p.$$

где η – коэффициент приближения реальной тяговой характеристики к идеальной (0,70); N – мощность локомотива, $N^{БКГ-1} = 2 \cdot 4 \cdot 800$ кВт; $F_{кр} =$

$$= 9,81(367 \cdot 0,7 \cdot 9 \cdot 600) / 100 = 241 \cdot 938 \text{ Н.}$$

Определение массы состава по подъему на железнодорожном пути при $V_p = 100$ км/ч

Масса состава определяется по формуле:

$$Q = (F_{кр} - P(w_0' + i_p)) / (w_0'' + i_p) \quad (1)$$

где w_0' – основное удельное сопротивление локомотива, Н/т; w_0'' – основное удельное сопротивление состава, Н/т.

Основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов в груженом состоянии определяется по формуле:

$$w_0'' = 0,7 + (3 + 0,1v + 0,0025v^2) / q_{04}.$$

$$w_0'' = 0,7 + (3 + 0,1 \cdot 100 + 0,0025 \cdot 100^2) / 25,0 = 2,22 \text{ Н/т.}$$

Основное удельное сопротивление движению локомотиву определяется по формуле:

$$w_0' = 1,9 + 0,008v + 0,00025v^2.$$

$$w_0' = 1,9 + 0,008 \cdot 100 + 0,00025 \cdot 100^2 = 5,2 \text{ Н/т.}$$

Основное удельное сопротивление движению поезда определяется как средневзвешенное для локомотива и состава (вагонов) по формуле:

$$w_0 = (w_0'P + w_0''Q) / (P + Q).$$

$$w_0 = (5,2 \cdot 200 + 2,22 \cdot 3500) / (200 + 3500) = 2,38 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда по кривой:

$$w_{r0} = g((700S_{кр})/RL_{по})k_s.$$

где R – радиус кривой, м; $S_{кр}$ – длина кривой, м; $L_{по}$ – длина поезда, м; k_s – коэффициент на сопротивление тележек экипажей.

$$w_{r0} = 9,81 \cdot ((700 \cdot 133,81) / 20000 \cdot 680) \cdot 1,1 = 0,07 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда при низкой температуре наружного воздуха (учитывается при температуре наружного воздуха ниже 10°C) определяется по формуле:

$$w_{нт} = k_{нт} w_0,$$

где $k_{нт}$ – коэффициент, принимаемый при абсолютной минимальной температуре воздуха (-38°C) [13], $k_{нт} = 0,008$.

$$w_{нт} = 0,008 \cdot 2,38 = 0,019 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда от встречного и бокового ветра определяется по формуле:

$$w_b = k_b w_0.$$

где k_b – коэффициент в зависимости от скорости ветра (15 м/с) и скорости поезда, $k_b = 0,425$.

$$w_b = 0,425 \cdot 2,38 = 1,01 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда вагонами вперед:

$$w_{вв} = (0,15 + i_c/1000) w_0,$$

$$w_{вв} = (0,15 + 4,2/1000) \cdot 2,38 = 0,37 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда в зависимости от состояния пути определяется по формуле:

$$w_{сп} = (k_{сп} - 1) w_0.$$

где $k_{сп}$ – коэффициент зависит от характеристики пути, $k_{сп} = 1,0$.

$$w_{сп} = (1,0 - 1) \cdot 2,38 = 0 \text{ Н/т.}$$

Уклон с учетом всех дополнительных сопротивлений:

$$i = gi_c + w_{r0} + w_{нт} + w_b + w_{вв} + w_{сп}.$$

$$i_p = 9,81 \cdot 4,2 + 0,07 + 0,019 + 1,01 + 0,37 + 0 = 42,58 \text{ Н/т.}$$

Таким образом, масса состава в соответствии с (1):

$$Q = (241938 - 200 \cdot (5,2 + 42,58)) / (2,22 + 42,58) = 5 \cdot 187 \text{ т} \approx 5 \cdot 200 \text{ т.}$$

Таким образом, масса состава для подачи на реконструируемый железнодорожный путь для поездов, ведомых локомотивом БКГ1-012 при движении на подъем $i_c = 4,2\%$ со скоростью 100 км/ч составит 5 200 т, что больше массы состава, состоящего из 35 платформ 13-491 ($35 \cdot 100 + 200 = 3700$ т). Проверяем полученное значение массы состава на трогание с места.

Проверка массы состава при трогании с места для четырехосной платформы 13-491.

Масса состава, состоящего из платформ:

$$Q^{вар.} = n^{вар.} \cdot q^{вар.}, \quad (2)$$

где $n^{вар.}$ – количество платформ в составе, шт.; $q^{вар.}$ – масса брутто ($q^{вар.} = 100$ т), т.

Массу составов определяем по формулам (1) и получаем для вагонов:

$$Q^{вар.} = 35 \cdot 100 = 3500 \text{ т.}$$

Рассчитанная по формуле (2) масса грузового состава проверяется на трогание с места на остановочных пунктах по формуле:

$$Q_{\text{тр}} = F_{\text{к тр}} / (w_{\text{тр}} + i_{\text{тр}}) - P, \quad (3)$$

где $F_{\text{к тр}}$ – касательная сила тяги при трогании с места, Н; $w_{\text{тр}}$ – удельное сопротивление состава при трогании с места, Н/т; $i_{\text{тр}}$ – уклон участка пути, на котором происходит трогание, ‰; P – расчетная масса локомотива, т.

Масса состава, рассчитанная по формуле (2), должна быть меньше массы состава, полученной по формуле (3), т.е. $Q^{\text{вар}} < Q_{\text{тр}}$.

Проверка массы состава при трогании с места будет определяться для электровоза БКГ1-012. В тяговых расчетах для определения массы состава силу тяги электровозов следует принимать на 7 % меньше расчетной. Касательная сила тяги при трогании с места определяется как

$$F_{\text{к тр}} = 774\,980 \cdot 0,93 = 720\,731 \text{ Н.}$$

Удельное сопротивление состава при трогании с места на площадке [17] для вагонов определяется по формуле:

$$w_{\text{тр}}^{\text{вар}} = 28 / (q^{\text{вар}}_0 + 7), \quad (4)$$

где $q^{\text{вар}}_0$ – масса, приходящаяся на ось колесной пары полувагона (т), –

$$q^{\text{вар}}_0 = q^{\text{вар}} / k^{\text{вар}}, \quad (5)$$

где $k^{\text{вар}}$ – количество осей платформы (для полувагона $k^{\text{вар}} = 4$).

По формуле (5) получаем:

$$q^{\text{вар}}_0 = 100 / 4 = 25,0 \text{ т.}$$

Определяем удельное сопротивление состава при трогании с места по формуле (4) получаем для платформы:

$$w_{\text{тр}}^{\text{вар}} = 28 / (25,0 + 7) = 0,88 \text{ Н/т.}$$

Уклон участка пути, на котором происходит трогание с места ($i_{\text{тр}}$) определяем подбором, и он равняется $i_c = 0$ ‰.

Расчетная масса локомотива составляет для БКГ1-012 $P = 200$ т.

По формуле (3) проверяем массу грузового состава, состоящего из платформ на трогание для тепловоза БКГ1-012:

$$Q^{\text{вар}}_{\text{тр}} = 720\,731 / ((0,88 + 4,2) \cdot 9,81) - 200 = 14\,262 \text{ т.}$$

Выполним сравнение масс грузовых составов из платформ с установленной нормой массы составов ($Q^{\text{вар}} < Q^{\text{вар}}_{\text{тр}}$):

$$\text{БКГ1-012} - 5\,200 < 14\,262 - \text{выполняется.}$$

Итак, трогание с места при уклоне 4,2 ‰ возможно осуществить локомотивом БКГ1-012.

Расчет условия удержания поездов вспомогательными тормозами локомотивов

Тормозную силу локомотива при удержании поезда на станции, имеющей спуск, вспомогательным тормозом локомотива определяется как:

$$B_{\text{T}} = 0,25 \cdot \Sigma K_{\text{P}} g,$$

где, ΣK_{P} – сумма расчетных сил нажатия тормозных колодок K_{P} (при грузе K_{P} равняется 18,0 на одну ось для БКГ1-012), кН.

Получаем:

$$B_{\text{T}} = 0,25 \cdot (4 \cdot 18) \cdot 9,81 = 176,58 \text{ кН.}$$

Для выполнения условия удержания поездов тормозная сила локомотива должна быть больше дополнительного сопротивления от уклона, т.е. необходимо выполнение следующего условия:

$$B_{\text{T}} > w_i, \quad (6)$$

где w_i – дополнительное сопротивление от уклона (тс), определяемое по формуле:

$$w_i = (P + Q) \cdot g \cdot i_{\text{тр}}. \quad (7)$$

По формуле (7) определяем дополнительное сопротивление грузового состава, состоящего из платформ для электровоза БКГ1-012:

$$w_i = (200 + 3\,500) \cdot 9,81 \cdot 0,0042 = 152,45 \text{ кН.}$$

Выполним сравнение с формулой (6) для грузовых составов:

$$176,58 > 152,42 - \text{выполняется.}$$

Таким образом, при уклоне 2,5 ‰ поезд возможно удержать на станции, имеющей спуск, только вспомогательным тормозом локомотива.

Из приведенных расчетов можно сделать следующий вывод: при переустройстве ПК 247+60 и прилегающих к нему участков на соответствие разности уклонов нормативным требованиям ($\Delta i \leq 6$ ‰) применение грузового локомотива БКГ1-012 позволяет реализовывать скорости 100 км/ч.

При расчете была выбрана платформа 13-491, так как она самая длинная и масса брутто наибольшая, из проходящих на данном участке.

Исходные данные: локомотив – ЭПМ (рис.5); масса моторного вагона $P = 40$ т; масса пассажирских вагонов (средний вес человека принят 80 кг) $Q = 230 + 0,080 \cdot 382 = 260,6$ т; длина поезда – $L_{\text{п}} = 134,54$ м; ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с²; средняя нагрузка на ось пассажирского вагона $q_0 = 33,75$ т; конструкционная скорость локомотива 200 км/ч; сила тяги при трогании $F_{\text{к тр}} = 294\,200$ Н; спрямленный максимальный уклон $i_c =$

$(1,5 \cdot 113,65) / 134,54 = 1,27$; радиус кривой $R = 20000$ м; длина кривой $S_{кр} = 133,81$ м.



Рис. 5. Электропоезд ЭПМ
Fig.5. Electric Train EP^m

Определение силы тяги при $V_p = 160$ км/ч

Касательная сила тяги электровоза при скорости 160 км/ч определяется по формуле:

$$F_{кр} = g (367\eta N) / V_p.$$

где η – коэффициент приближения реальной тяговой характеристики электровоза к идеальной, (0,70); N – мощность локомотива, $N^{ЭП} = 3900$ кВт;

$$F_{кр} = 9,81 \cdot (367 \cdot 0,7 \cdot 3900) / 160 = 61\,430 \text{ Н.}$$

Определение массы состава по подъему при $V_p = 160$ км/ч

Масса состава определяется по формуле:

$$Q = (F_{кр} - P(w_0' + i_p)) / (w_0'' + i_p),$$

где w_0' – основное удельное сопротивление локомотива, Н/т; w_0'' – основное удельное сопротивление состава, Н/т.

Основное удельное сопротивление движению [18] с пассажирами определяется как:

$$w_0'' = 0,7 + (3 + 0,1v + 0,0025v^2) / q_0.$$

$$w_0'' = 0,7 + (3 + 0,1 \cdot 160 + 0,0025 \cdot 160^2) / 33,75 = 3,16 \text{ Н/т.}$$

Основное удельное сопротивление движению электровоза под током определяется:

$$w_0' = 1,9 + 0,01v + 0,0003 v^2.$$

$$w_0' = 1,9 + 0,01 \cdot 160 + 0,0003 \cdot 160^2 = 11,18 \text{ Н/т.}$$

Основное удельное сопротивление движению поезда определяется как средневзвешенное для локомотива и состава (вагонов) по формуле:

$$w_0 = (w_0'P + w_0''Q) / (P + Q).$$

$$w_0 = (11,18 \cdot 40 + 3,16 \cdot 260,6) / (40 + 260,6) = 4,22 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда по кривой:

$$w_{г0} = g((700S_{кр})/RL_{п})k_s.$$

где R – радиус кривой, м; $S_{кр}$ – длина кривой, м; $L_{п}$ – длина поезда, м; k_s – коэффициент на сопротивление тележек экипажей, 1,1 –

$$w_{г0} = 9,81 \cdot ((700 \cdot 133,81) / (20000 \cdot 134,54)) \cdot 1,1 = 0,38 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда при низкой температуре наружного воздуха (учитывается при температуре наружного воздуха ниже 10°C) определяется как

$$w_{нт} = k_{нт} w_0,$$

где $k_{нт}$ – коэффициент, принимаемый при абсолютной минимальной температуре воздуха (-38°C), равный 0,008 [12] –

$$w_{нт} = 0,008 \cdot 4,22 = 0,034 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда от встречного и бокового ветра определяется по формуле:

$$w_{в} = k_{в} w_0,$$

где $k_{в}$ – коэффициент, зависящий от скоростей ветра (15 м/с) и движения поезда, $k_{в} = 0,425$ [12].

$$w_{в} = 0,425 \cdot 4,22 = 1,79 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда вагонами вперед

$$w_{вв} = (0,15 + i_c/1000) w_0,$$

$$w_{вв} = (0,15 + 1,5/1000) \cdot 4,22 = 0,64 \text{ Н/т.}$$

Дополнительное удельное сопротивление при движении поезда в зависимости от состояния пути определяется по формуле:

$$w_{сп} = (k_{сп} - 1) w_0,$$

где $k_{сп}$ – коэффициент, зависящий от характеристики пути, $k_{сп} = 1,0$ –

$$w_{сп} = (1,0 - 1,0) \cdot 4,22 = 0 \text{ Н/т.}$$

Уклон с учетом всех дополнительных сопротивлений:

$$i = g i_c + w_{г0} + w_{нт} + w_{в} + w_{вв} + w_{сп}.$$

$$i_p = 9,81 \cdot 1,5 + 0,38 + 0,034 + 1,79 + 0,64 = 17,56 \text{ Н/т.}$$

Таким образом масса состава:

$$Q = (61430 - 40 \cdot (11,18 + 17,56)) / (3,16 + 17,56) \approx 2909 \text{ т.}$$

В итоге, масса состава для подачи на проектируемый железнодорожный путь для электропоезда ЭПМ при движении на подъем $i_c = 1,5$ ‰ со скоростью 160 км/ч составит 2 909 т, что больше состава с 382 пассажирами массой 260,6 т.

Проверка массы состава при трогании с места электровоза ЭПМ

Масса пассажирских вагонов с людьми:

$$Q_{\text{ваг.}} = n^{\text{чел.}} \cdot q^{\text{чел.}} + P_{\text{ваг}} \quad (8)$$

где $n^{\text{ваг.}}$ – количество человек, чел.; $q^{\text{чел.}}$ – масса человека ($q^{\text{чел.}} = 0,08$), т; $P_{\text{ваг}}$ – масса пассажирских вагонов (т) –

$$Q_{\text{ваг.}} = 382 \cdot 0,08 + 230 = 261 \text{ т.}$$

Расчитанная по формуле (8) масса состава проверяется на трогание с места на останочных пунктах по формуле:

$$Q_{\text{тр}} = F_{\text{к тр}} / (w_{\text{тр.}} + i_{\text{тр}}) \cdot g - P, \quad (9)$$

где $F_{\text{к тр}}$ – касательная сила тяги при трогании с места, кгс; $w_{\text{тр.}}$ – удельное сопротивление состава при трогании с места, кгс/т; $i_{\text{тр}}$ – уклон участка пути, на котором происходит трогание, ‰; P – расчетная масса локомотива, т.

Масса состава в (8), должна быть меньше массы состава в (9), т.е. $Q_{\text{ваг.}} < Q_{\text{тр}}$.

Проверка массы состава при трогании с места будет определяться для электровоза ЭПМ.

В тяговых расчетах для определения массы состава силу тяги электровозов следует принимать на 7% меньше расчетной. Касательная сила тяги при трогании с места:

$$F_{\text{к тр}} = 61 \, 430 \cdot 0,93 = 57 \, 130 \text{ Н.}$$

Удельное сопротивление состава при трогании с места на площадке для вагонов [17] определяется по формуле:

$$w_{\text{ваг. тр.}} = 28 / (q_{\text{ваг. 0}} + 7), \quad (10)$$

где $q_{\text{ваг. 0}}$ – масса, приходящаяся на ось колёсной пары пассажирского вагона, т:

$$q_{\text{ваг. 0}} = q^{\text{ваг.}} / k^{\text{ваг.}}, \quad (11)$$

где $k^{\text{ваг.}}$ – количество осей платформы, равное 2.

По формуле (11) получаем:

$$q_{\text{ваг. 0}} = 77,14 / 2 = 38,57 \text{ т.}$$

Удельное сопротивление состава при трогании с места по формуле (10) для платформы:

$$w_{\text{ваг. тр.}} = 28 / (38,57 + 7) = 0,61 \text{ Н/т.}$$

Уклон участка пути, на котором происходит трогание с места ($i_{\text{тр}}$) определяем подбором, и он равняется $i_c = 1,5$ ‰

Расчетная масса для ЭПМ $P = 40$ т.

По формуле (9) проверяем массу состава из 7-ми вагонов на трогание для электровоза ЭПМ:

$$Q_{\text{ваг. тр.}} = 57130 / (0,61 + 1,5) \cdot 9,81 - 40 = 2720 \text{ т.}$$

Выполним сравнение масс грузовых составов из платформ с установленной нормой массы составов ($Q_{\text{ваг.}} < Q_{\text{ваг. тр.}}$):

$$\text{ЭПМ} - 261 < 2720 - \text{выполняется.}$$

Таким образом, трогание с места при уклоне 1,5 ‰ возможно осуществить электровозом ЭПМ.

Расчёт условия удержания поездов вспомогательными тормозами локомотивов

Тормозную силу локомотива при удержании поезда на станции, имеющей спуск, вспомогательным тормозом локомотива, определяют как:

$$B_{\text{T}} = 0,25 \cdot \Sigma K_{\text{Pг}},$$

где ΣK_{P} – сумма приведенных сил нажатия тормозных колодок K_{P} (при груженом режиме K_{P} равняется 18,0 на одну ось для ЭПМ), кН.

$$B_{\text{T}} = 0,25 \cdot (1 \cdot 18) \cdot 9,81 = 44,15 \text{ кН.}$$

Для выполнения условия удержания поездов тормозная сила локомотива должна быть больше дополнительного сопротивления от уклона, т.е. необходимо соблюдение неравенства:

$$B_{\text{T}} > w_i. \quad (12)$$

где w_i – дополнительное сопротивление от уклона (тс) определяется по формуле:

$$w_i = (P + Q) \cdot i_{\text{тр}} \cdot g \quad (13)$$

По (13) определяем дополнительное сопротивление состава из 7-м вагонов для ЭПМ:

$$w_{\text{ваг. i}} = (40 + 260,6) \cdot 0,0015 \cdot 9,81 = 4,4 \text{ кН.}$$

Выполним сравнение по (12) для грузовых составов:

$$45 > 4,4 - \text{выполняется.}$$

Таким образом, при уклоне 1,5 ‰ поезд возможно удержать на станции, имеющей спуск.

Из расчета следует, что при переустройстве ПК 252+80 и прилегающих к нему участков на соответствие разности уклонов нормативным требованиям ($\Delta i \leq 6$ ‰) применение электропоезда ЭПМ позволяет реализовывать скорости 160 км/ч.

Заключение

Для увеличения пропускной и провозной способностей участка необходимо:

1. Изменить показатели профиля в местах, где разность уклонов превышает нормативное значение (ПК247+60,00 и ПК252+80,00). На ПК247+60,00 и соседних участках уклон уменьшен до 4,2 ‰, а на ПК252+80,00 и соседних участках уклон уменьшен до 1,5 ‰.

2. Для реализации повышения пропускной и провозной способностей предложено применение локомотивов БКГ-012 (для грузового движения) и ЭПМ (Stadler) 01 (для пассажирского движения).

3. Тяговые расчеты, выполненные для данных локомотивов, показали реализацию более высоких скоростей движения грузовых и пассажирских поездов на перепроектированном участке, увеличив пропускную и провозную способности (примерно на 14 %).

4. Тяговые расчеты выполняются отдельно для переустраиваемых участков, так как скорость будет изменяться только в этих местах,

а на остальных участках между отдельными пунктами скорость движения останется практически неизменной.

Для окончательной оценки предложенных мероприятий и их внедрения выполняется полный тяговый расчет с построением кривой скорости на всем участке между отдельными пунктами.

Список литературы

1. Аль-Арадж Модар. Обоснование повышения мощности железных дорог в ЕТС Сирийской Арабской Республики : дис. ... канд. техн. наук / Аль-Арадж Модар ; Петербур. гос. ун-т путей сообщ. СПб., 2000. 202 с.
2. Электровозы серии БКГ Белорусской железной дороги // Центр інформації транспорту України : сайт. URL : <https://railway-publish.com/articles-icut-magazine/articles-lokomotiv-inform/8319-elektrovozyi-serii-bkg-beloruskoy-zheleznoy-dorogi.html>. (Дата обращения: 27.12.2021).
3. Довгелюк Н.В., Ахраменко Г.В., Вербило В.А. Реконструкция железных дорог. БелГУТ, 2017. 339 с.
4. Браништов С.А., Ширванян А.М., Тумченко Д.А. Методы оценки пропускной способности железных дорог // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5. С. 51–57.
5. Krueger H. Parametric Modeling in Rail Capacity Planning // Winter Simulation Conf. Piscataway. 1999. P. 1194–1200. DOI:org/10.1145/324898.325036
6. Kaas A. Methods to Calculate Capacity of Railways (Metoder Til Beregning af Jernbanekapacitet) : phd-thesis / Technical University of Denmark. Denmark, 1998. 182 p.
7. Ерофеев А.А., Ковтун П.В., Дубровская Т.А. Проблемы повышения скорости движения поездов на существующих железнодорожных линиях // Вестник БелГУТа. 2018. № 39. С. 57–60.
8. Увеличение пропускной способности // helpiks.org : сайт. URL: <https://helpiks.org/8-86807.html>. (Дата обращения: 19.12.2021).
9. Миронов В.С., Дубровская Т.А. Сфера эффективности скоростного пассажирского транспорта на железных дорогах // Транспортная инфраструктура сибирского региона : материалы Девятой междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 2018. Т.1. С. 534–538.
10. СНБ 3.03.01-98. Железные дороги колеи 1520 мм. Минск : М-во архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1998. 26 с.
11. Галай Э.И., Рудов П.К., Галай Е.Э. Исследование взаимодействия тормозных систем электровозов вл80, бкг1 и состава вагонов при выводе грузового поезда с перегона // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. Гомель, 2018. С. 18–20.
12. Локомотивы развития // Железнодорожник Белоруссии : сайт. URL: <http://xpress.by/2018/11/21/lokomotivy-razvitiya/> (Дата обращения: 24.12.2021).
13. Особенности локомотивного хозяйства в Республике Беларусь и мировой опыт ведения локомотивного хозяйства // studbooks.net : сайт. URL: https://studbooks.net/2169698/ekonomika/osobennosti_lokomotivnogo_hozyaystva_respublike_belarus_mirovoy_opyt_vedeniya_lokomotivnogo_hozyaystva/ (Дата обращения: 23.12.2021).
14. Дубровская Т.А. Увеличение пропускной и провозной способности железнодорожного пути // Проблемы безопасности на транспорте : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. Гомель, 2020. Ч. 4. С. 24–25.
15. Об установлении скоростей движения поездов на Белорусской железной дороге (с изменениями и дополнениями) : приказ начальника дороги от 28 апр. 2021 № 231Н. Минск. 2021. 93 с.
16. Френкель С. Я. Техника тяговых расчетов. Гомель : БелГУТ, 2005. 80 с.
17. Сахаров П.А. Тяговые расчеты для участка железной дороги. Гомель : БелГУТ, 2016. 107 с.
18. Золотых Н.С. Усиление пропускной способности железнодорожных линий // Труды 80-й студенческой научно-практической конференции РГУПС. Воронеж, 2021. Ч. 2. С. 58–59 с.

References

1. Al'-Aradzh Modar Obosnovaniye povysheniya moshchnosti zheleznykh dorog v ETS Siriyskoi Arabskoi Respubliki [Justification for increasing the capacity of railways in the UTS of the Syrian Arab Republic]. Candidate's thesis. Saint Petersburg, PSTU, 2000, 202 p.
2. Elektrovozy serii BKG Belorusskoi zheleznoi dorogi [Electric locomotives of the BKG series of the Belarusian Railway]. Available at: <https://railway-publish.com/articles-icut-magazine/articles-lokomotiv-inform/8319-elektrovozyi-serii-bkg-beloruskoy-zheleznoy-dorogi.html> (Accessed December 27, 2021).
3. Dovgelyuk N.V., Akhramenko G.V., Verbilo V.A. Rekonstruktsiya zheleznykh dorog [Reconstruction of railways]. Gome: BelGUT Publ., 2017. 339 p.
4. Branishtov S.A., Shirvanyan A.M., Tumchenok D.A. Metody otsenki propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog [Methods of assessing the capacity of railways]. *Informatsionno – upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems]. 2014, no 5, pp. 51-57.

5. Krueger H. Parametric Modeling in Rail Capacity Planning // Proc. of 1999 Winter Simulation Conf., Piscataway, 1999. P. 1194 – 2000.
6. Kaas A. Methods to Calculate Capacity of Railways (Metoder Til Beregning af Jernbanekapacitet): Phd-thesis / Technical University of Denmark, 1998. 182 p.
7. Erofeev A.A., Kovtun P.V., Dubrovskaya T.A. Problemy povysheniya skorosti dvizheniya poezdov na sushchestvuyushchikh liniyakh [Problems of increasing the speed of trains on existing railway lines]. *Vestnik BelGUTa* [Bulletin of BelGUT]. 2018, no 2(37), pp. 57 – 59.
8. Uvelicheniye propusknoi sposobnosti [Increasing bandwidth]. Available at: <https://helpiks.org/8-86807.html>. (Accessed 19.12. 2021).
9. Mironov V.S., Dubrovskaya T.A. Sfera effektivnosti skorostnogo passazhirskogo transporta na zheleznykh dorogakh [The sphere of efficiency of high-speed passenger transport on railways]. *Materialy Devyatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transportnaya infrastruktura sibirskogo regiona»* [Proceedings of the Ninth International scientific-practical conference «Transport infrastructure of the Siberian region»]. Irkutsk, 2018, vol. 1, pp. 534-538.
10. SNB 3.03.01-98. Zheleznyye dorogi kolei 1520mm [1520 mm gauge railways. National Standard 3.03.01-98]. Minsk: Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', 1998. 26 p.
11. Galai E.I., Rudov P.K., Galai E.E. Issledovanie vzaimodeystviya tormoznykh sistem ehlektrovozov vl80, bkg1 i sostava vagonov pri vyvode gruzovogo poezda s pereгона [Investigation of the interaction of the brake systems of electric locomotives vl80, bkg1 and the composition of cars during the withdrawal of a freight train from the haul]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye voprosy i perspektivy razvitiya transportnogo i stroitel'nogo kompleksov»* [Proceedings of IV International scientific and practical conference «Actual problems and perspectives of the development of transport and construction complexes»]. Gomel', 2018, pp. 18–20.
12. Lokomotivy razvitiya [Locomotives of development]. Available at: <http://xpress.by/2018/11/21/lokomotivy-razvitiya/> (Accessed December 24, 2021).
13. Osobennosti lokomotivnogo hozyaistva v Respublike Belarus' i mirovoi opyt vedeniya lokomotivnogo hozyaistva [Features of locomotive farming in the Republic of Belarus and the world experience of locomotive farming]. Available at: https://studbooks.net/2169698/ekonomika/osobennosti_lokomotivnogo_hozyaistva_respublike_belarus_mirovoy_opyt_vedeniya_lokomotivnogo_hozyaistva/ (Accessed December 23, 2021).
14. Dubrovskaya, T.A. Uvelichenie propusknoi i provoznoi sposobnosti zheleznodorozhnogo puti [Increasing the capacity and carrying capacity of the railway track]. *Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno – prakticheskoi konferentsii «Problemy bezopasnosti na transporte»* [Proceedings of the X International scientific and practical conference «Problems of safety in transport»]. Gomel', 2020, part IV, pp. 24–25.
15. Prikaz nachal'nika dorogi ot 28 aprelya 2021 №231N «Ob ustanovlenii skorostei dvizheniya poyezdov na Belorusskoi zheleznoi doroge (s izmeneniyami i dopolneniyami)» [Order on the establishment of train speeds on the Belarusian Railway (with changes and additions)]. Minsk, 2021, 93 p.
16. Frenkel S. Ya. Tekhnika tyagovykh raschetov [Technique of traction calculations]. Gomel: BelSUT Publ., 2005. 80 p.
17. Sakharov P.A. Tyagovye raschety dlya uchastka zheleznoi dorogi [Traction calculations for the section of the railway]. Gomel: BelSUT Publ., 2016. 107 p.
18. Zolotykh N.S. Usilenie propusknoi sposobnosti zheleznodorozhnykh linii [Strengthening the capacity of railway lines]. *Trudy 80-y studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii RGUPS* [Proceedings of 80th student scientific and practical conference of RSTU]. Voronezh, 2021, part II, pp. 58–59.

Информация об авторах

Дубровская Татьяна Алексеевна, канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: rt-555@yandex.ru

Тавтын Анастасия Валентиновна, кафедра проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: tavtyn98@mail.ru

Information about the authors

Tatyana A. Dubrovskaya, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department «Design, construction and operation of transport facilities», Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: rt-555@yandex.ru

Anastasiya V. Tavtyn, Department «Design, construction and operation of transport facilities», Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: tavtyn98@mail.ru