



Обоснование нормативов деформативности подрельсового и подшпального оснований



Евгений АШПИЗ
Evgeny S. ASHPIZ

Александр ЗАМУХОВСКИЙ
Alexander V. ZAMUHOVSKIY



*Ашпиз Евгений Самуилович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ).
Замуховский Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» МИИТ.*

В статье изложены подходы к обоснованию для различных эксплуатационных условий нормативов упругих осадок подрельсового и подшпального оснований, получаемых в ходе нагрузочных испытаний. Критерии качества при обеспечении стабильности рельсовой колеи, уровни надежности железнодорожного пути и оптимизация расходов на его содержание.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельсовая колея, подрельсовое и подшпальное основания, уровни надежности, нормативы деформативности, нагрузочные испытания.

В целях оптимизации затрат на обслуживание технических средств и обеспечения необходимого уровня безопасности в ОАО «РЖД» утверждена «Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте» [1]. В рамках этой концепции (кратко – УРРАН) в МИИТ по заказу холдинга «РЖД» разрабатывается методика определения показателей надежности и уровней риска путевой инфраструктуры [2], составляются паспорта показателей надежности для дистанций пути.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ получаемых нами данных подтверждает, что во многом показатель надежности путевой инфраструктуры определяется отказами и повреждениями в параметрах геометрии рельсовой колеи [3]. В то же время стабильность геометрии колеи в немалой степени зависит от показателей деформативности подшпального основания, которое работает в сложных условиях, воспринимая большие величины вибродинамического воздействия подвижного состава и сезонные изменения агре-

гатного состояния, периодически промерзая и оттаивая. Это приводит к широкому распространению на сети железных дорог дефектов и деформаций в виде выплесков и балластных углублений.

Проблема обеспечения стабильности подшпального основания становится особенно острой на линиях, где предусматривается введение скоростного пассажирского движения либо повышение осевых или погонных нагрузок в грузовом движении (как, например, полигоне Рыбное – Челябинск).

Поэтому одним из важных направлений обеспечения надежности путевой инфраструктуры является повышение качества балластных материалов и усиление грунтов основной площадки земляного полотна за счет создания подбалластных защитных слоев. При этом среди критериев надежного подшпального основания заметное место занимают показатели его деформативности: упругие осадки или модули деформации.

Наибольший опыт по выработке критериев качества подшпального основания для обеспечения его стабильности имеется на железных дорогах Германии. Согласно инструктивному документу по земляному полотну DS 836 в зависимости от типа дороги (пассажирская, грузовая, местная) и максимальной скорости движения для подшпального основания регламентируются модули деформации [4], определяемые в отдельных сечениях в нескольких уровнях по глубине.

К недостаткам такого нормирования относятся, с одной стороны, необходимость большого количества трудоемких измерений, а с другой – точность оценки по протяжению пути.

На российских железных дорогах для подготовки линий к скоростному пассажирскому движению поездов были введены рекомендательные нормы упругих осадок, получаемых при непрерывных по протяжению нагрузочных испытаниях мобильными диагностическими комплексами [5]. В настоящее время эксплуатируется два типа таких нагрузочных комплексов СПМ-18 и СМ-460, которые отличаются конструкцией и схемой нагружения, а значит, и величинами упругих осадок одного участка пути.

Нагрузочное устройство комплекса СПМ-18 состоит из двух платформ на тележках типа ЦНИИ-ХЗО, создающих нагрузку 10 и 23,2 т/ось. Осадку рельса измеряют роликами, расположенными на расстоянии 0,56 м от внутренних осей платформ. У комплекса СМ-460 два нагрузочных колеса, расположенных посередине вагона между тележками. Нагрузка на путь создается гидравлической системой. Измерение осадки рельса производят по перемещению нагрузочного колеса относительно измерительной каретки, имеющей базу 6,4 м. Оба комплекса измеряют также осадку шпал непосредственно под нагрузочной осью.

В данной работе поставлена задача обосновать численные значения нормативов деформативности подшпального основания для разных эксплуатационных условий по результатам испытаний нагрузочными комплексами с использованием опыта нормирования на железных дорогах Германии.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Как известно, действующая сейчас методика расчетов пути на прочность [6] рассматривает железнодорожный путь как балку, лежащую на сплошном упругом основании. При этом для расчета применяют гипотезу Винклера [7]. Несмотря на ряд существенных допущений, эта гипотеза нашла широкое применение в расчете строительных конструкций и железнодорожного пути за счет относительной простоты математического аппарата и достаточной точности результатов [8].

В соответствии с [6] упругий прогиб рельса или осадка пути под действием системы сосредоточенных сил в расчетном сечении определяется зависимостью

$$y = \frac{k}{2U} \sum_n P_i \eta_i, \quad (1)$$

где k – коэффициент относительной жесткости пути, м^{-1} ;

U – модуль упругости подрельсового основания (модуль упругости пути), МПа;

P_i – i -я сосредоточенная сила, действующая от колеса на рельс, кН;

η_i – коэффициент, равный значению линии влияния от i -й силы в расчетном сечении.



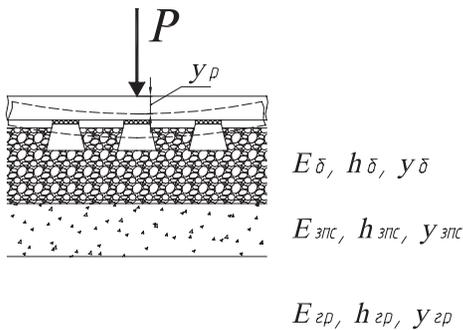


Рис. 1.

В свою очередь:

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EI}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости рельсовой стали, МПа;

I – момент инерции рельсового сечения относительно горизонтальной оси, m^4 –

$$\eta = e^{-kx} (\cos kx + \sin kx), \quad (3)$$

где x – расстояние от сосредоточенной силы до расчетного сечения, м.

В случае действия одной оси формула (1) примет вид

$$y = \frac{k}{2U} P. \quad (4)$$

С другой стороны подрельсовое основание представляет собой сложную систему, состоящую из промежуточных скреплений, шпал, балластного слоя и земляного полотна, рабочая зона которого может содержать несколько слоев. Тогда путь можно рассматривать как балку, лежащую на многослойном основании, рис. 1.

Каждый из грунтовых слоев характеризуется модулем деформации, толщиной и соответствующей осадкой. Тогда осадку рельса можно выразить как сумму упругих осадок всех слоев:

$$y = y_{скр} + y_{б} + y_{зпс} + y_{зр}, \quad (5)$$

где в правой части находится сумма упругих осадок скреплений, балластного слоя, защитного подбалластного слоя (ЗПС) и грунта рабочей зоны земляного полотна соответственно.

Упругую осадку балласта можно определить по формуле:

$$y_{б} = \frac{\sigma_{б}}{E_{б}} h_{б}, \quad (6)$$

где $\sigma_{б}$ – напряжения в балласте под шпалой, МПа;

$E_{б}$ – модуль деформации балласта на уровне нижней постели шпалы, МПа;

$h_{б}$ – толщина балластного слоя, м.

Напряжения в балласте под шпалой равны

$$\sigma_{б} = \frac{2Q}{\Omega}, \quad (7)$$

где Q – нагрузка на шпалу, передаваемая от рельса, кН;

Ω – эффективная площадь опоры шпалы, m^2 .

Коэффициент 2 в числителе означает, что расчет ведется для одной рельсовой нити и в знаменателе находится эффективная площадь полушпалы.

Нагрузку на шпалу определим по формулам:

– в случае действия многих осей

$$Q = \frac{kl_{ш}}{2U} \sum P_i \eta_i; \quad (8 а)$$

– в случае одной оси

$$Q = \frac{Pkl_{ш}}{2U}, \quad (8 б)$$

где $l_{ш}$ – расстояние между осями шпал, м.

Упругую осадку ЗПС можно определить по формуле, аналогичной (6):

$$y_{зпс} = \frac{\sigma_{зпс}}{E_{зпс}} h_{зпс}, \quad (9)$$

где $\sigma_{зпс}$ – напряжения на верхней границе ЗПС, МПа;

$E_{зпс}$ – модуль деформации на поверхности ЗПС, МПа;

$h_{зпс}$ – толщина защитного подбалластного слоя, м.

Для определения осадки грунта рабочей зоны земляного полотна (ЗП), поскольку его толщина неизвестна, воспользуемся формулой, приведенной в [5], аналогичной формулам, применяемым при проведении штамповых испытаний грунтов для определения их модуля деформации [9,10]:

$$y_{зр} = \frac{2 \cdot n \cdot r \cdot \sigma_{зр} (1 - \mu^2)}{E_{зр}}, \quad (10)$$

где n – коэффициент штампа;

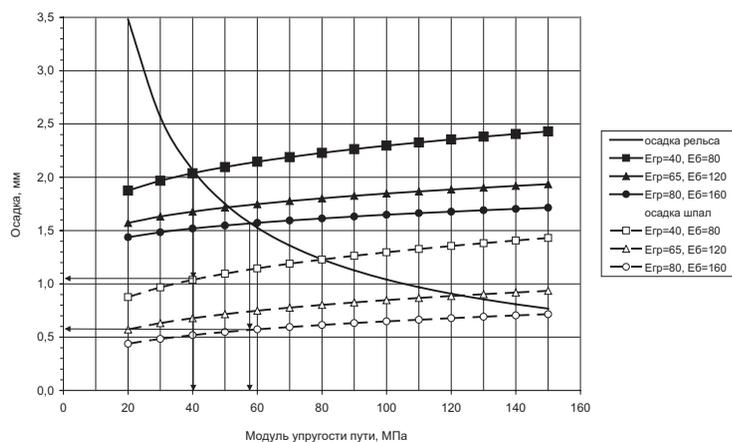


Рис. 2. Зависимости осадки рельса и шпала от модуля упругости подрельсового основания и модулей деформации балластного слоя и на поверхности грунта ЗП для СМ-460.

$$r = \sqrt{\frac{F}{\pi}} \text{ — приведенный радиус штампа}$$

площадью F , м²;

μ — коэффициент Пуассона грунта рабочей зоны ЗП;

σ_{ep} — напряжения на верхней границе грунта ЗП, МПа;

E_{ep} — модуль деформации грунта рабочей зоны ЗП, МПа.

Таким образом, приведенные формулы позволяют, зная нагрузку на рельс и модули деформации, определить осадку рельса. Поэтому задаваясь нормативными значениями модулей деформации, принятыми из норм DS 836, можно получить величины осадок рельса и шпала в ходе испытаний нагрузочными комплексами, которые и могут быть приняты за нормативы для железных дорог России.

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Для определения нормативов осадок рельса по головке (подрельсовое основание) и по шпале (подшпальное основание) проведем расчеты по приведенным формулам, задаваясь различными модулями упругости подрельсового основания и модулями деформации балластного слоя и по подошве балластной призмы.

В расчетах нормативные модули деформации балластного слоя и на поверхности подбалластного слоя приняты близкими к требованиям железных дорог Германии [4], которые приведены в таблице 1. В расчетах принята толщина щебеночного балласта под шпалой 40 см. Доля осадки, формируемой промежуточными скрепле-

ниями, принята по результатам испытаний нагрузочными комплексами, проведенными на участках пути с новыми прокладками.

Результаты расчетов для СМ-460 и СПМ-18 представлены на рис. 2 и 3.

На рис. 2 и 3 графики «осадка рельса» отражают зависимость по формуле (1), а остальные — по формуле (5) при различных соотношениях модулей деформации подшпального основания. Поскольку формулы (1) и (5) определяют зависимости упругой осадки рельса от модуля упругости пути при разных моделях, расчетное значение упругой осадки будет на пересечении графиков этих зависимостей.

Из графиков рис. 2 и 3 видно, что, измеряя осадку рельса и шпала, можно оценить модуль деформации подшпального основания, при этом для разных по конструкции нагрузочных устройств следует применять разные нормативы.

НОРМАТИВЫ ОСАДОЧНОСТИ ПОДШПАЛЬНОГО ОСНОВАНИЯ

В зависимости от категории линии и периода жизненного цикла нормативы осадочности подшпального основания можно определить, исходя из нормативных значений модуля деформации балласта на уровне нижней постели шпала и модуля деформации на уровне подошвы балластной призмы, приведенных в таблице 1, и расчетных значений осадок шпала для комплексов СМ-460 и СПМ-18.

Для этого воспользуемся графиками осадок рельса и подшпального основания в зависимости от нормативных значений модулей деформации балласта на уровне





Рис. 3. Зависимости осадки рельса и шпал от модуля упругости подрельсового основания и модулей деформации балластного слоя и на поверхности грунта ЗП для СПМ-18.

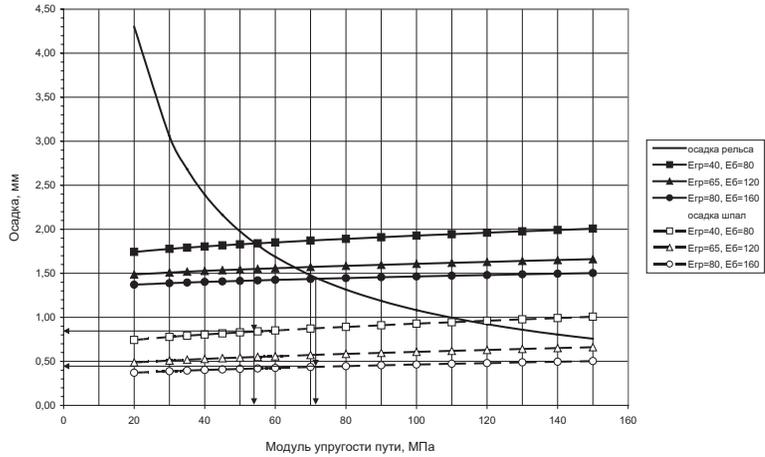


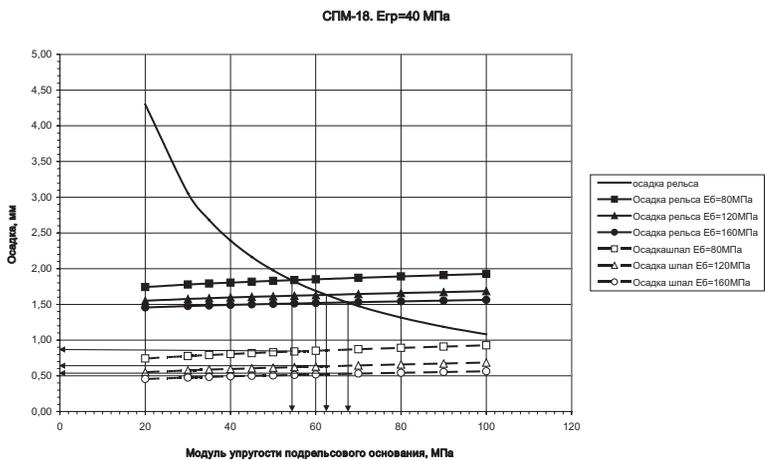
Таблица 1

Модули деформации балластного слоя и на поверхности подбалластного слоя

Скорости движения поездов, км/ч*	Модуль деформации балластного слоя E_{v2} , МПа			по подошве балластной призмы E_{v2} , МПа
	Загрязненный	Эксплуатируемый	Новый	
Высокоскоростные 250/-	80	120	160	120
Скоростные 200/-	80	120	160	65
140/80	80	120	160	50
80/80	80	120	160	40

*) в числителе – пассажирских, в знаменателе – грузовых.

Рис. 4. Графики осадок подрельсового и подшпального основания при модуле деформации подбалластного основания 40 МПа.



нижней постели шпалы и подошвы балластной призмы. Графики осадок для комплекса СПМ-18 приведены на рис. 4–7, для комплекса СМ-460 – на рис. 8–11.

Величины осадок, получаемых в ходе нагрузочных испытаний, не должны для качественного основания превышать значения, приведенные в таблице 2.

При расчете суммарных осадок по формуле (5) значение доли осадки

скреплений априорно задано равным 1,0 мм. Это значение получено при осреднении результатов нагрузочных испытаний пути после капитального ремонта или реконструкции. В связи с этим можно рекомендовать при обработке результатов нагрузочных испытаний для получения доли осадки подшпального основания проводить корректировку среднего значения доли осадки промежу-

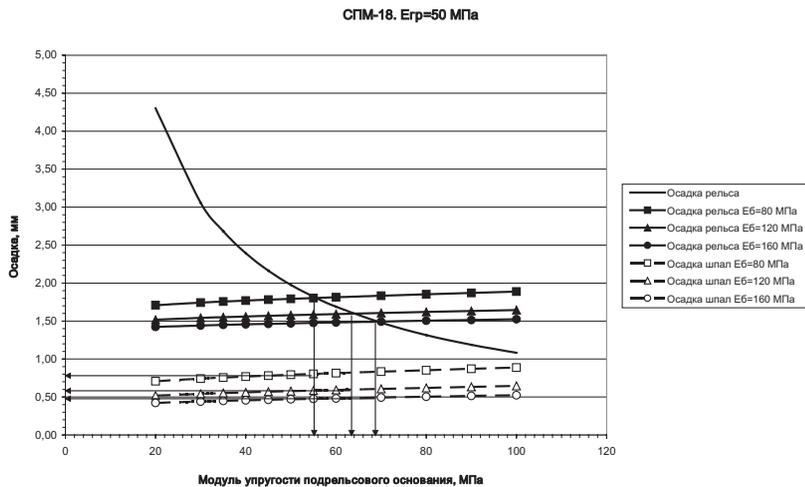


Рис. 5.
Графики осадок подрельсового и подшпального основания при модуле деформации подбалластного основания 50 МПа.

Нормативные значения осадок рельса и подшпального основания

Тип нагрузочного устройства	Группа пути	Тип шпал	Состояние пути	Нормы осадки (деформации скрепления), мм		
				по рельсу y_r , мм	по шпале $y_{ш}$, мм	скрепления $\delta_{скр}$, мм
СМ-460	Скоростные и групп Аи Б	Железобетонные	После ремонта	2,1	0,9	1,2
			Перед ремонтом	2,4	1,1	1,3
	Групп В-Е	Железобетонные	После ремонта	2,3	1,0	1,3
			Перед ремонтом	2,6	1,2	1,4
Групп В-Е	Деревянные	После ремонта	2,9	1,4	1,5	
		Перед ремонтом	3,3	1,6	1,7	
СПМ-18	Скоростные и групп Аи Б	Железобетонные	После ремонта	1,4	0,7	0,7
			Перед ремонтом	1,6	0,8	0,8
	Групп В-Е	Железобетонные	После ремонта	1,5	0,7	0,8
			Перед ремонтом	1,8	0,9	0,9
	Групп В-Е	Деревянные	После ремонта	1,6	0,8	0,8
			Перед ремонтом	1,8	0,9	0,9

Таблица 2

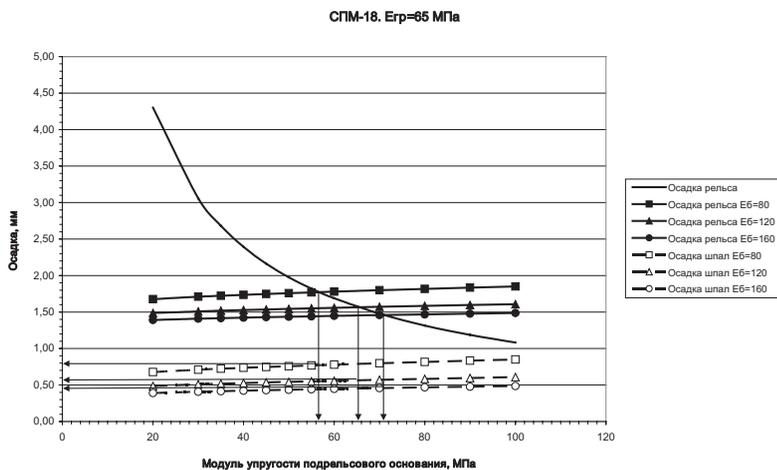


Рис. 6. Графики осадок подрельсового и подшпального основания при модуле деформации подбалластного основания 65 МПа.



Рис. 7. Графики осадок подрельсового и подшпального основания при модуле деформации подбалластного основания 80 МПа.

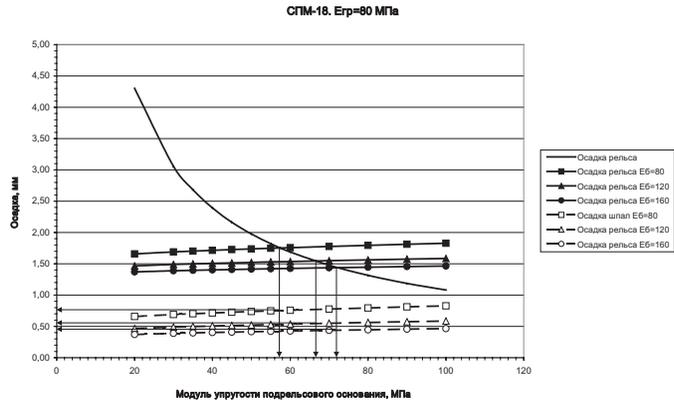


Рис. 8. Графики осадок подрельсового и подшпального основания при модуле деформации подбалластного основания 40 МПа.

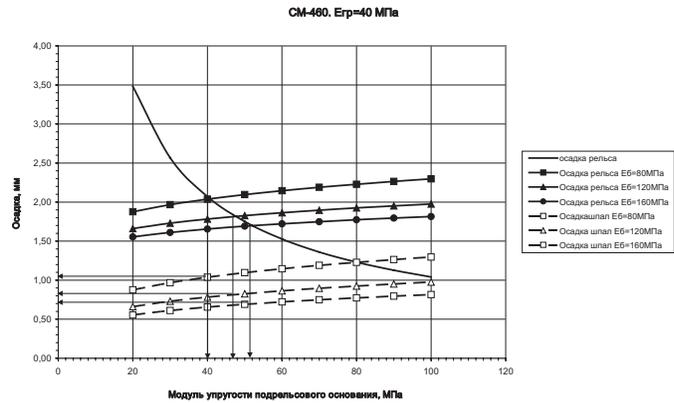
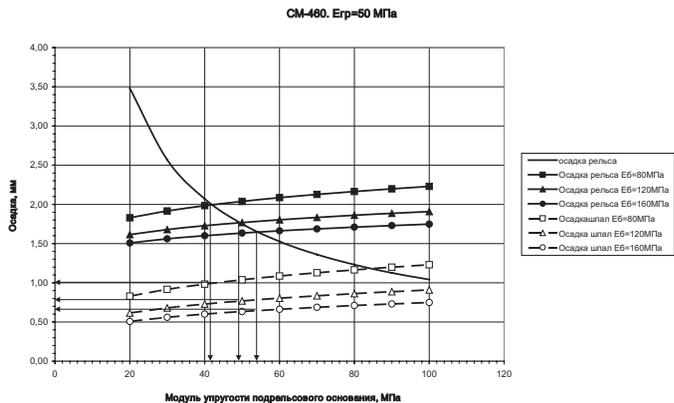


Рис. 9. Графики осадок подрельсового и подшпального основания при модуле деформации подбалластного основания 50 МПа.



точных креплений по их фактическому значению.

Нормативное значение принимается как средняя величина плюс СКО на протяжении пикета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложено обоснование нормативов осадок рельса и подшпального основания для железнодорожных линий с разными эксплуатационными условиями

(группы пути), получаемых по результатам нагрузочных испытаний передвижными диагностическими комплексами.

Данные нормативы могут быть использованы для оценки состояния как эксплуатируемого пути, так и качества пути после проведения ремонтов. Использование нормативов позволит получить оценку надежности балласта и рабочей зоны земляного полотна для стабилизации геометрии рельсовой колеи.

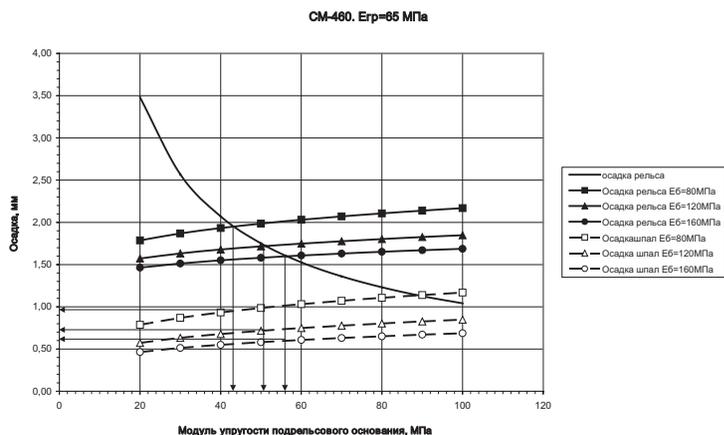


Рис. 10. Графики осадок подрельсового и подшпального основания при модуле деформации подбалластного основания 65 МПа.

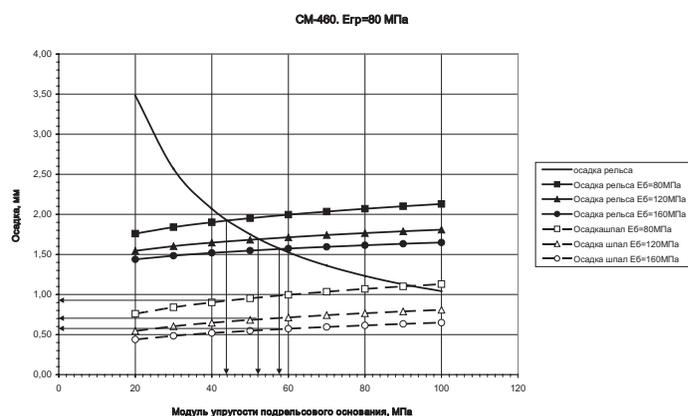


Рис. 11. Графики осадок подрельсового и подшпального основания при модуле деформации подбалластного основания 80 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте. Утверждена 31.07.2010 г.
2. Ашпиз Е. С. Подход к расчету показателей надежности элементов пути//Мир транспорта. – 2011. – № 5.
3. Загитов Э. Д., Гринь Е. Н., Гречаник А. В. Надежность верхнего строения пути: апробация показателей//Мир транспорта. – 2011. – № 5.
4. Lichtberger B. Track Compedium. Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. – Hamburg: Eurailpress, 2005.
5. Методические указания по усилению основания пути и подготовке его к пропуску пассажирских

поездов с повышенными скоростями. – М.: МПС РФ, 2000.

6. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности/ЦПТ-52–14, 15.06.2000.
7. Дарков А. В., Кузнецов В. И. Основы теории расчета балок на упругом основании. – М.: ГТЖИ, 1940.
8. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь. – М.: Трансжелдориздат, 1961.
9. ГОСТ 20276–99. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.
10. DIN 18134. Строительный грунт. Испытания и испытательное оборудование. Испытания на сжатие плитой.

SUBSTANTIATION OF DEFORMABILITY STANDARDS

Ashpiz, Evgeny S. – D.Sc. (Tech), professor, head of the department of railway tracks and track facilities of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

Zamuhovskiy, Alexander V. – Ph. D. (Tech), associate professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT).

The authors describe methods of substantiation of standards of resilient subsidence of under-rail and under-sleeper bedding, caused by loading tests under different operative conditions. The article refers to quality criteria for rail-gauge stability, reliability levels for railway track, optimization of maintenance costs.

Key words: track, rail-gauge, under-rail and under-sleeper bedding, stability level, standards of deformability, loading test.

Координаты авторов (contact information): Ашпиз Е. С. – geonika@inbox.ru, Замуховский А. В. – miit.prx@gmail.com

