

И. А. БОНДАРЕНКО (ДИИТ)

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ДЕФОРМАТИВНОСТИ ЖЕЛЕЗНО-ДОРОЖНОГО ПУТИ**

Запропоновано внести критерій з оцінки деформативності колії. Внесено пропозиції по його значеннях.

Предложено внести критерий по оценке деформативности пути. Внесены предложения по его значениям.

It is offered to bring in a criterion on an estimation of deformation capability of a railway track. The offers on its values are given.

Конструкции верхнего строения пути, рекомендуемые «Положениям про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України» [1], имеют достаточную прочность для принятия вопроса об увеличении скорости движения и нагрузки поездов. Однако напряжения, возникающие в элементах конструкций пути, рекомендованных согласно условиям эксплуатации [1], гораздо ниже, нежели их ограничивающие значения. Поэтому необходимы не только прочностные критерии для принятия решений по данным вопросам, но и учет показателей надежности пути (безотказности, долговечности, ремонтпригодности). Все они косвенно отражаются в [1]. Одним из параметров безотказности является интенсивность накопления остаточных деформаций в пути. Данный критерий связан с долговечностью пути. Процесс накопления остаточных деформаций постепенный, но интенсивность этого накопления различна и зависит от многих факторов, в том числе и от жесткости пути, т.е. жесткости его элементов, а также жесткости связей между этими элементами. Учитывая зависимость между значениями модуля упругости пути в вертикальной плоскости и прогибами пути: чем меньше значение модуля упругости пути, тем больше прогиб; и рассматривая дальнейшую связь: чем больше прогиб, тем больше амплитудно-частотные колебания, чем они больше, тем быстрее расстраивается путь; таким образом, возникает необходимость в искусственном ограничении значений модуля упругости пути. Данное ограничение требует либо использования более мощной техники для уплотнения подшпального основания, либо укрепления конструкции пути георешетками или подбалластным слоем, толщина которого рассчитывается с учетом рода грунта земляного

полотна. Такие методы широко применяются странами Европы [2–5].

В задачах взаимодействия пути и подвижного состава одним из основных элементов модели является подрельсовое основание. Известно, что при одинаковой нагрузке и прочих равных условиях значения жесткости подрельсового основания могут существенно отличаться в зависимости от состояния и параметров элементов, слагающих подрельсовое основание [6]. Расчеты показывают [7], что удельный вес основных элементов пути (шпалы – балласт – земляное полотно в %) в формировании модуля упругости летом оценивается следующими значениями:

При модуле упругости пути:

|        |             |
|--------|-------------|
| 23 МПа | 09; 11; 80, |
| 28 МПа | 11; 17; 72, |
| 47 МПа | 23; 25; 52. |

В опытах, проведенных на дорогах ФРГ [8], установлено, что удельный вес в общей вертикальной деформации пути на деревянных шпалах элементов (шпалы и прокладки – балласт – земляное полотно) может быть представлен соотношением (в %) 20; 55; 25, а железобетонных – 5; 70; 25.

Эти значения можно рассматривать лишь как характеризующие порядок влияния различных элементов строения пути на формирование жесткости пути. Следует заметить, что влияние конструкции и характеристик материала элементов пути на формирование жесткости пути могут существенно влиять на указанные выше соотношения.

Одной из составляющих конструкции пути, как уже было сказано, является земляное полотно. В работах [9–12] была показана степень его влияния на деформативность пути. На рис. 1, 2 и в табл. 1 приведены некоторые результаты такого влияния, полученные с помо-

щью метода конечных элементов (МКЭ) для следующей конструкции пути: рельсы типа Р65, шпалы типа Ш1-1, крепление КБ с толщиной прокладок 7 и 10 мм, балласт щебеночный с толщиной слоя под шпалой 0,4 м, толщина песчаной подушки 0,2 м.

Для вышеперечисленных исходных данных были проведены расчеты с помощью МКЭ [9–12]. Все элементы конструкции пути рассматривались как объекты с соответствующими параметрами, учитывающими как геометрические, так и физические свойства, впоследствии объединенные в единую модель. К обоим рельсам прикладывались вертикальные силы. Место и площадь приложения сил соответствуют месту и площади контакта колесной пары вагона с железнодорожной колеей при центральном положении первой. После проведения расчета получаем параметры напряженно-деформированного состояния как всей модели в целом, так и

отдельных ее элементов. Приступая к моделированию с помощью МКЭ, нужно отметить, что основной особенностью данного моделирования является то, что модуль упругости не является входящей величиной в расчете. Данная величина не может быть подобрана, она рассчитывается по известным зависимостям [13, 14] и является расчетной характеристикой. На определение значений данной величины, как и в действительности, влияет конструкция пути, т.е. составляющие ее элементы; их геометрические и физико-механические параметры; существующая связь между этими элементами; величина нагрузки, воздействующей на данную конструкцию. В данной модели закладываются модули упругости материалов каждого элемента, что приводит к необходимости выбора модулей упругости балластного слоя и земляного полотна, шпал и других элементов.

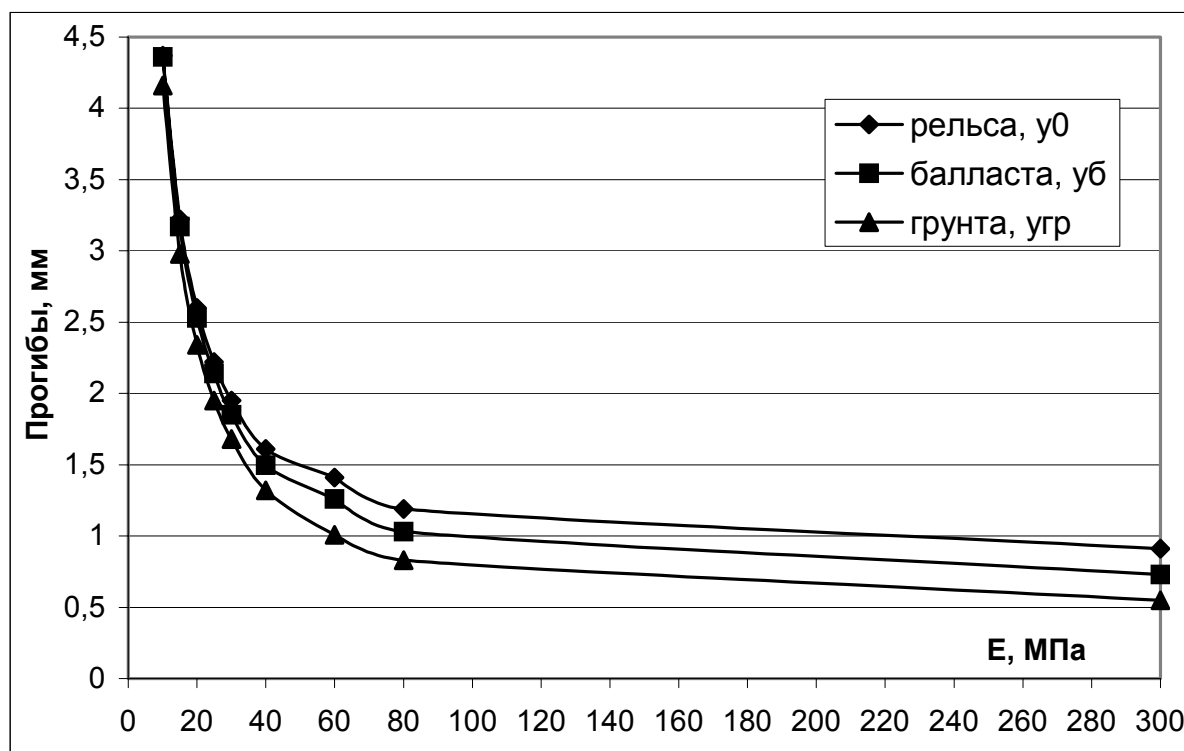


Рис. 1. График зависимости прогибов рельса, балласта и земляного полотна для пути на железобетонных шпалах в зависимости от модулей упругости грунта

На графике можно выделить три зоны. Первая зона при модулях упругости грунта 0...20 МПа, где происходит стремительное уменьшение прогибов указанных элементов пути. Вторая зона с модулями упругости грунта 20...80 МПа, которой соответствует плавное снижение прогибов рассматриваемых элементов пути. И третья зона 80...∞ МПа, где прогибы элементов пути изменяются по линейной

зависимости. Нужно отметить, что с увеличением модулей упругости грунта доля прогибов земляного полотна уменьшается, а других элементов увеличивается. Увеличение доли прогибов рельсов в суммарном прогибе с возрастанием модулей упругости грунта выравнивается с долей балласта. Однако при этом доли прогибов балласта и рельсов в три раза меньше, чем земляного полотна, а сумма их частей состав-

ляет 75 % от части земполотна и 40 % от суммарного прогиба. Так, соотношения прогибов рельсов, балласта и земляного полотна для различных грунтов при указанной конструкции

пути приведены в табл. 1. Данные соотношения действительны при отсутствии люфтов между элементами пути.

Таблица 1

Соотношения доли прогибов рельсов, балласта и земляного полотна в общем прогибе конструкции для различных грунтов

| Род грунта                  | Соотношения в % |             |
|-----------------------------|-----------------|-------------|
|                             | от              | до          |
| Пылевато-суглинистые грунты | 4; 9; 87        | 5; 9; 86    |
| Супесь и легкий суглинок    | 5; 9; 86        | 7; 11; 82   |
| Средний и тяжелый суглинок  | 2; 6; 93        | 4; 9; 87    |
| Глина легкая                | 0.2; 4.8; 95    | 5; 9; 86    |
| Глина средняя               | 3; 9; 88        | 13; 17; 70. |
| Глина тяжелая               | 13; 17; 70      | 20; 20; 60  |

Для дальнейшего сопоставления рассчитывались для рассматриваемой конструкции по закону сохранения кинетической энергии системы «колесо – путь», используя описанную в [15] методику, приведенные к контакту колеса

и рельса массы рельсошпальной решетки  $m_{рш}$ , балласта  $m_b$ , грунта  $m_{гр}$  и пути  $m_{п}$ . Результаты расчетов представлены на рис. 2.

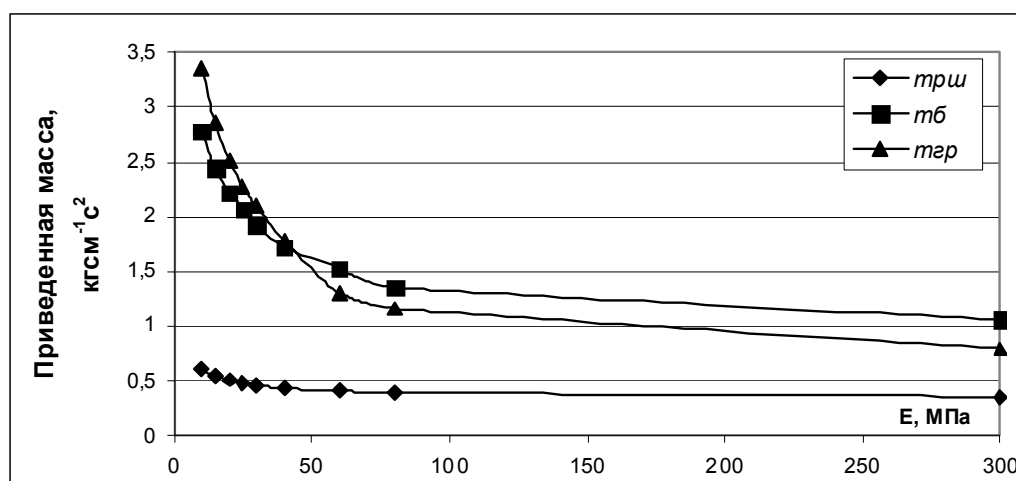


Рис. 2. График зависимости приведенных масс рельсошпальной решетки, балласта и земляного полотна для пути на железобетонных шпалах в зависимости от модулей упругости грунта при нагрузке 25 т/ось

График на рис. 2 демонстрирует, что для данных конструкций пути при модулях упругости грунта до 30 МПа, что соответствует приблизительно 34 МПа модуля упругости пути, нагрузка, равная 25 т/ось, воспринимается за счет осадки грунтов земляного полотна. На интервале 30...50 МПа, в зависимости от характеристик балласта и шпал, происходит перераспределение восприятия нагрузки. При модулях деформации грунта более 50 МПа нагрузка перерабатывается балластным слоем.

Такие расчеты производились при различных нагрузках, так, при снижении нагрузки на

3 т/ось уменьшаются приведенные массы рельсошпальной решетки на 5 %, балласта – на 4 %, земляного полотна – на 6 %. При этом интервал усиленной работы балластного слоя сдвигается на 10 МПа, а перераспределение восприятия нагрузки происходит на интервале 40...60 МПа.

На сегодняшний момент можно говорить об одном факторе, не позволяющем контролировать деформативность пути. Этим фактором является модуль упругости грунтов, слагающих земляное полотно. Т.к. земляное полотно является долговременным сооружением, то все ра-

боты по его усилению должны проводиться под максимально возможные в отдаленной перспективе погонные и осевые нагрузки, массы грузовых и скорости движения всех типов поездов.

Как показывают исследования, частично отраженные на графике зависимости прогибов рельса, шпал, балласта и земляного полотна для различных конструкций пути в зависимости от модулей упругости грунта (рис. 1), существует зона, в которой изменение значений перечисленных величин происходит стремительно. Как указывалось, при анализе влияния модулей упругости грунта на значения модулей упругости пути, эта зона соответствует интервалу значений модуля упругости грунта до 20 МПа. Данный диапазон не случаен. Так, в строительстве грунты основания считаются однородными [16], т.е. мало изменчивыми в отношении сжимаемости, если удовлетворено одно из условий:

- 1)  $E_{\min} \geq 20$  МПа;

- 2) при  $E_{\min} = 15 \dots 20$  МПа;

$$\frac{E_{\max}}{E_{\min}} = 1,8 \dots 2,5 ;$$

- 3) при  $E_{\min} = 7,5 \dots 15$  МПа;

$$\frac{E_{\max}}{E_{\min}} = 1,3 \dots 1,6 ,$$

где  $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$  – модули упругости грунтов.

При таком отношении модулей сжимаемости осадки грунтов в отдельных точках мало разнятся по величине, и возможность выдавливания грунтов сведена к минимуму.

Требования, предъявляемые нормативными документами к материалам и системе содержания верхнего строения пути, позволяют контролировать его деформативность.

Что касается требований, предъявляемых к земляному полотну, то они сводятся к надлежащему уплотнению грунта при постройке, чтобы насыпь работала практически в упругой стадии, приданию земляному полотну очертаний, способствующих надежному отводу воды и укреплению откосов. При недостаточности этих мероприятий, а также во всех случаях, когда осадка основания может повлечь за собой недопустимые деформации и расстройство тела насыпи, производят необходимую мелиорацию грунта основания. Таким образом, добиваются, чтобы грунты земляного полотна относились к однородным.

Поэтому, используя строительные нормы, можно установить ограничение по величине модуля упругости земляного полотна, т.е. составляющие его грунты должны иметь значение модуля упругости не ниже 20 МПа. При соблюдении таких требований можно считать состояние пути по деформативности удовлетворительным.

Так, согласно принятым нормам Германии, состояние пути считается плохим при модуле упругости пути  $U \leq 9$  МПа, хорошим - при  $U \geq 90$  МПа. Для интегральной оценки прочности рельсового основания в качестве меры используются модули упругости земляного полотна и основания земляного полотна (DIN 18134), а также их степени уплотнения (DIN 18127). Земляное полотно рассматривается как предохранительный слой, укладываемый на заранее подготовленное основание (имеющийся на данном участке грунт). Этот слой не пропускает воду, устойчив к промерзанию, имеет высокую несущую способность, хорошо распределяет нагрузку и стабилизирует вибрации. Толщина земляного полотна выбирается в зависимости от конкретных характеристик и назначения пути по заранее рассчитанным таблицам и графикам, чтобы обеспечивались соответствующие величины модулей деформации и степени уплотнения. Так, модуль упругости земляного полотна, по нормам данной страны, при скоростях  $V \leq 160$  км/ч должен быть  $E_{\text{зн}} \geq 50$  МПа,  $E_{\text{гр}} \geq 20$  МПа, а для строящихся главных путей  $E_{\text{зн}} \geq 120$  МПа,  $E_{\text{гр}} \geq 80$  МПа, степени уплотнения, соответственно, 0,95; 0,93 и 1,03; 1,00. Кроме этих ограничений, значение модуля упругости балласта строго контролируется и должно быть  $E_b \geq 150$  МПа.

На железных дорогах США понятие «земляное полотно» соответствует принятому в странах СНГ. Поэтому в качестве меры для интегральной оценки прочности рельсового основания используют модуль упругости пути, и стремятся повысить его значение в основном за счет осушения и уплотнения земляного полотна. По нормам данной страны рельсовое основание считается:

очень слабым при  $7 \leq U < 14,1$  МПа,

слабым при  $14,1 \leq U < 21,1$  МПа,

средним при  $21,1 \leq U < 28,1$  МПа,

мощным при  $28,1 \leq U < 35,1$  МПа,

очень мощным при  $U \geq 35,1$  МПа.

Как свидетельствуют вышеприведенные данные, деформация земляного полотна не мо-

жет не влиять на формирование модуля упругости пути. Степень этого влияния можно уменьшить либо повысив жесткость грунта, слагающего земляное полотно (опыт стран СНГ), либо усилив за счет дополнительного слоя, обладающего большей несущей способностью (опыт Германии).

Предложенный критерий необходимо контролировать. Но на данном этапе абсолютно отсутствуют какие-либо требования по жестко-

стным параметрам, как ко всей конструкции пути, так и к какому-либо элементу подрельсового основания. Что, в свою очередь, не дает возможности оценить деформативность конструкции пути и принять решения по его изменению.

Поэтому предлагается ввести критерии деформативности к нижнему строению пути, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

**Качественная оценка деформативности земляного полотна**

| Оценка              | Модуль деформации грунта для конструкции на деревянных шпалах, МПа | Модуль деформации грунта для конструкции на железобетонных шпалах, МПа |
|---------------------|--|--|
| Отлично             | $30 \leq E_{гр} < 60$  | $50 \leq E_{гр} < 120$   |
| Хорошо              | $20 \leq E_{гр} < 30$  | $20 \leq E_{гр} < 50$  |
| Удовлетворительно   | $10 \leq E_{гр} < 20$  | $10 \leq E_{гр} < 20$  |
|                     | $E_{гр} \geq 60$   | $E_{гр} \geq 120$  |
| Неудовлетворительно | $E_{гр} < 10$  | $E_{гр} < 10$  |

А на основании предложенной качественной оценки деформативности земляного полотна с учетом предлагаемых ПППР [1] конструкций

верхнего строения пути необходимо ввести качественную оценку деформативности конструкции пути, приведенную в табл. 3.

Таблица 3

**Качественная оценка деформативности железнодорожного пути**

| Категории пути               | Отлично          | Хорошо           | Удовлетворительно           | Неудовлетворительно |
|------------------------------|------------------|------------------|-----------------------------|---------------------|
| I, II                        | $46 \leq U < 76$ | $22 \leq U < 46$ | $12 \leq U < 22, U \geq 76$ | $U < 13$            |
| III                          | $40 \leq U < 66$ | $19 \leq U < 40$ | $11 \leq U < 66, U \geq 66$ | $U < 11$            |
| IV                           | $38 \leq U < 62$ | $18 \leq U < 38$ | $10 \leq U < 18, U \geq 62$ | $U < 10$            |
| V, VI, VII<br>бесстык. путь  | $36 \leq U < 60$ | $18 \leq U < 36$ | $10 \leq U < 18, U \geq 60$ | $U < 10$            |
| V, VI, VII<br>звеньевой путь | $30 \leq U < 62$ | $17 \leq U < 30$ | $10 \leq U < 17, U \geq 62$ | $U < 10$            |

Ввод дополнительного технико-экономического критерия позволит: комплексно и дифференцированно учитывать показатели надежности пути при решении вопросов по увеличению скорости движения и осевой нагрузке поездно-го состава, повысить влияние и эффективность использования балластного слоя (до 4,2 раза), скреплений (до 6 раз) и шпал (до 3 раз), что в ряде случаев позволит уменьшить воздействие

вертикальных сил на путь (до 3,8 раза), т.е. позволит продлить работоспособное состояние железнодорожного пути.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України. ЦПО113 від 10.08.2004, № 630-ЦЗ. [Текст]. – К., 2004. – 32 с.

2. Alias, J. La voie ferrée [Текст] / J. Alias. – Paris: Eyrolles, 1977.
3. ORE D117 rp28: «Design charts for the track/foundation system» [Текст]. – Utrecht, September 1983.
4. DIN: Deutsches Institut für Normung «DIN 18134» [Текст]. – Vangaard M., 1999.
5. DIN: Deutsches Institut für Normung «DIN 18127» [Текст].
6. Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго, А. Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986. – С. 71-74.
7. Новичков, В. П. Рациональные способы усиления железнодорожного пути [Текст] / В. П. Новичков // Ж.-д. транспорт. – 1956. – № 4. – С. 66-68.
8. Birman, F. Neure Messung an Gleisen mit verschiedenen Unterschwellung [Текст] / F. Birman // Eisenbahntechnische Rundschau. – Juli 1957. – Н. 7. – S. 229-246.
9. Выбор расчетной схемы и параметров железнодорожного пути при расчете методом конечных элементов [Текст] / В. Д. Данович и др. – Строительство: Сб. науч. тр. ДИИТа. – Вып. 10. – Д., 2002. – С. 35-45.
10. Влияние параметров грунта на значения вертикального модуля упругости пути [Текст] / В. Д. Данович и др. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 2. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2003. – С. 151-154.
11. Бондаренко, И. А. К вопросу определения модуля упругости пути в вертикальной плоскости [Текст] / И. А. Бондаренко. – Транспортні системи і технології. – Вип. 5. – К.: КУЕТТ, 2004. – С. 16-27.
12. Рыбкин, В. В. О корректировке правил расчетов железнодорожного пути на прочность [Текст] / В. В. Рыбкин, И. А. Бондаренко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – № 2 (9). – Гомель, 2004. – С. 42-44.
13. Вериго, М. Ф. Вертикальные силы, действующие на путь при прохождении подвижного состава [Текст] / М. Ф. Вериго. – Тр. ВНИИЖТ. – Вып. 97. – М: Трансжелдориздат, 1955. – С. 25-288.
14. Ершков, О. П. Характеристики пространственной упругости рельсовой нити [Текст] / О. П. Ершков. – Тр. ВНИИЖТ. – Вып. 192. – М., 1960. – С. 59-101.
15. Вериго, М. Ф. Общие положения для корректировки Правил расчетов железнодорожного пути на прочность и предложения по изменению этих правил [Текст] / М. Ф. Вериго, С. С. Крепкогорский. – Тр. ЦНИИ МПС. – 1972. – Вып. 466. – С. 6-42.
16. Линович, Л. Е. Расчет и конструирование частей гражданских зданий [Текст] / Л. Е. Линович. – К.: Будівельник, 1972. – 664 с.

Поступила в редколлегию 25.08.2008.