

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

В статті наведені результати аналізу напружено-деформованого стану земляного полотна при модернізації.

Ключові слова: земляне полотно, модернізація, протидеформаційні заходи

Кроме объемов строительства железных дорог в Украине также увеличиваются объемы ремонта и реконструкции земляного полотна, в том числе и при модернизации под скоростное движение. Такое увеличение объемов требует внедрения новых технических решений по уменьшению деформаций основной площадки земляного полотна и, соответственно, увеличению сроков его нормальной эксплуатации.

В настоящее время предложены новые решения, заключающиеся как в усилении земляного полотна геосинтетическими материалами, так и в изменении его поперечного сечения с образованием бERM, banquetов и контрбанкетов, и требующие научного обоснования. Причем, сравнение решений с дальнейшей их оптимизацией требует комплексного анализа различных параметров, таких как прочность земляного полотна, обеспечивающая нормативный срок эксплуатации и номинальные денежные затраты на переустройство и его реконструкцию.

Комплексность анализа и дальнейшей оптимизации параметров земляного полотна обеспечивает привлечение при рассмотрении конкретной ситуации большего объема входной информации, что позволяет получить более обоснованные решения для выполнения реконструкции.

Целью представленной работы является комплексная оптимизация параметров земляного полотна при его реконструкции, которая заключается в поиске и обосновании технико-экономических и прочностных параметров насыпи при реконструкции с выбором на основе этих результатов оптимального варианта, что является актуальной задачей.

Земляное полотно является одним из важнейших элементов пути, так как оно выполнено из грунта и располагается на грунтовом основании [1-2]. Оно должно быть прочным, устойчивым и долговечным, что требует минимума затрат на его устройство, содержание и ремонт, и обеспечивать возможность широкой механи-

зации работ. Одной из причин безусловности выполнения указанных требований является то, что земляное полотно в системе путевого хозяйства составляет наиболее фондоемкую часть, так как в основных фондах путевого хозяйства стоимость земляного полотна достигает 30 % [2].

Поверхность земляного полотна и полосы отвода должна быть спланирована так, чтобы вода нигде не застаивалась, а имела бы свободный и быстрый отток от земляного полотна в стороны или в специальные водоотводящие устройства. Если это условие где-нибудь нарушится, то земляное полотно в этом месте неизбежно подвергнется деформации, которая может создать угрозу безопасности движения поездов.

Земляное полотно строится по типовым поперечным профилям или индивидуальным проектам (ДБН «Сооружения транспорта. Железнодорожные пути 1520 мм»), и оно должно обеспечивать безопасность движения поездов с заданными нагрузками и скоростями при установленной грузонапряженности. Земляное полотно, его элементы и сооружения должны соответствовать нормативам прочности и устойчивости в течение всего периода службы.

В земляном полотне и его сооружениях могут возникать и накапливаться дефекты, деформации и повреждения [3]. Дефекты являются следствием недоработок при проектировании земляного полотна, его защитных и укрепительных сооружений, нарушения технологии строительного процесса и временной эксплуатации железнодорожных линий неудовлетворительного текущего содержания и некачественных ремонтов пути.

Деформации земляного полотна и его сооружений возникают при: недостаточной несущей способности грунтов, из которых оно возведено; несоответствии мощности верхнего строения пути нагрузке от подвижного состава; недостаточной защите грунтов земляного по-

лотна от неблагоприятных воздействий климатических и инженерно-геологических факторов. Низкое качество текущего содержания земляного полотна и его сооружений, когда не обеспечивается отвод поверхностных и грунтовых вод, несвоевременно устраняются мелкие дефекты земляного полотна и его сооружений, не ликвидируются причины снижения несущей способности грунтов, приводят к перерастанию мелких дефектов и повреждений в опасные деформации, угрожающие безопасности движения поездов.

Под повреждением понимается неисправность земляного полотна и его сооружений, произошедшей во время эксплуатации под воздействием неблагоприятных природных условий, вследствие ненормальных, непредвиденных характером работы действий и взаимодействием с посторонними конструкциями.

Дефекты, деформации и повреждения земляного полотна и его сооружений подлежат устранению в процессе текущего содержания пути, при планово-предупредительных ремонтах верхнего строения пути, а также при ремонтах и усилении земляного полотна по индивидуальным проектам.

Одним из предложений протидеформационных мероприятий при ремонте земляного полотна является сплошная вырезка, при которой работы ведутся во время выдачи окна при закрытых путях. До начала основных работ по нечетному пути демонтируются звенья рельсошпальной решетки. Затем во время окна ведется демонтаж инвентарных рельсов и выполнение сплошной вырезки. Глубина вырезки по нечетной колее принята исходя из глубины балластных углублений. По парной колее глубина сплошной вырезки принята конструктивно на такую же отметку, как и по нечетной.

Обратная засыпка производится с послойным уплотнением и устраивается из щебня или щебеночной смеси. Размер фракций щебня в смеси 0,0625...50 мм. Количество пылеватых частиц размером < 0,0625 мм не должна превышать 5 % от объема вырезки, размером 2...20 мм – до 40 %, остальные 55 % приходятся на фракцию 20...50 мм.

При ремонте верхнего строения пути геотекстиль укладывается на основной площадке с уклоном 0,04 в полевую сторону с перекрытием одного слоя другим не меньше чем на 100 мм. Геотекстиль – это нетканый материал с поверхностной плотностью ≥ 280 г/м², прочностью на растяжение не менее 20 кН/м; прочностью при относительном удлинении на 10 % – не менее

10 кН/м; относительное удлинение при разрушении не более 20 %. После укладки рельсошпальной решетки проводится балластировка пути. Укрепление откосов земляного полотна выполняется путем отсыпки однополочной отжимной бермы с выположением откосов земляного полотна 1:2. Пригрузочная отжимная берма устраивается с использованием щебня крупностью 40...70 мм и прочностью на сжатие 800...1200 МПа. Отсыпка отжимной бермы осуществляется послойно с уплотнением слоя толщиной 0,2...0,3 м. Средняя высота полка отжимной бермы составляет 5,0 м с уклоном верха полки 0,002 в сторону проектной водоотводящей канавы. В качестве материала бермы используется местный грунт. Для отвода воды из большого участка через железобетонную трубу по нечетной стороне пути необходимо создать берму и канаву шириной 1,5 м и высотой 0,6 м с выположением откосов 1:2.

Вторым вариантом является выполнение бортовой вырезки. Двусторонняя боковая срезка балластных углублений осуществляется от линии по торцам шпал в сторону откоса насыпи с последующей заменой срезанного материала чистым щебнем крупностью 40...70 мм и прочностью на сжатие 800...1200 МПа. Толщина слоя 0,2...0,3 м. Все работы необходимо проводить в долговременные окна.

Для обеспечения устойчивости откосов насыпи запроектировано выположение откосов насыпи до 1:2 и отсыпка прогруженной отжимной бермы, которая устраивается с использованием щебня крупностью 40...70 мм. Ее отсыпка производится послойно с уплотнением слоя толщиной 0,2...0,3 м. Средняя высота полка отжимной бермы составляет 5,0 м с уклоном верха полки 0,002 в низовую сторону.

Со стороны нечетной колее по подошве прогруженной отжимной бермы устраивается берма шириной 6,0 м с уклоном 0,002 в сторону проектной водоотводной канавы. В качестве материала бермы используется местный грунт, полученный после нарезки уступов и работ по бортовой вырезке.

Технико-экономическое сравнение двух вариантов противодеформационных мероприятий проводилось на основе комплекса АВК-3. На основе этих материалов сделаны следующие выводы. Сводный сметный расчет стоимости строительства основных объемов работ и материалов при выполнении работ по сплошной вырезке составляет – 3868,0 тыс. грн. Договорная цена определяется с учетом строительных работ, что в свою очередь составляют 2219,7

тыс. грн, стоимость монтажных работ – 15,3 тыс. грн, и других расходов – 1633,3 тыс. грн. Сметная стоимость строительства составляет 1746,9 тыс. грн, трудоемкость – 62,9 тыс. чел-ч, заработная плата – 915,6 тыс. грн; вместе по смете – 3223,6 тыс. грн, налог на добавленную стоимость (НДС) (20 %) – 644,7 тыс. грн. Средний разряд работ – 3,4.

Сводный сметный расчет стоимости строительства основных объемов работ и материалов при выполнении работ по бортовой вырезке составляет – 1235,9 тыс. грн. Договорная цена складывается из строительных работ, что в свою очередь составляют 670,5 тыс. грн, монтажных работ – 15,3 тыс. грн, других расходов – 550,1 тыс. грн.

Сметная стоимость строительства – 515,9 тыс. грн, трудоемкость – 21,9 тыс. чел-ч, заработная плата – 291,4 тыс. грн, всего по смете – 1029,9 тыс. грн, налог на добавленную стоимость (НДС) (20 %) – 205,9 тыс. грн. Средний разряд работ – 2,5.

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) двухпутной насыпи с выполнением нескольких вариантов реконструкции (сплошная и бортовая вырезка) проводился с применением метода конечных элементов с помощью расчетного комплекса Structure CAD for Windows, version 7.29 R.3 (SCAD) [4]. Все геометрические и деформационные характеристики земляного полотна взяты из нормативной документации. Модель для расчета принята пространственной на основе объемных конечных элементов (КЭ) для большего учета реальных характеристик исследуемого объекта, реализованная в комплексе SCAD.

Общее количество узлов схемы – 8 632 шт. (около 26 тыс. степеней свободы), количество конечных элементов – 7,016 тыс. шт. (до реконструкции); 8,28 тыс. (около 24 тыс. степеней свободы) и 6722 (сплошная вырезка); 8126 (около 25 тыс. степеней свободы) и 6582 (бортовая вырезка). Конечные элементы (КЭ) в схеме приняты совместимыми, т.е. все узлы соседних элементов совпадают, что положительно влияет на точность решения. Размеры модели: длина (основа) – 38,46 м, ширина – 1,8 м (для всех моделей), высота – 8,0 м (из которых высота земляного полотна, как и в других вариантах – 4,5 м).

Размеры КЭ колеблются в пределах $0,30 \times 0,5 \times 0,5$, $0,35 \times 0,5 \times 0,5$ до $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м, т.е. КЭ-сетка адекватна размерам представленной модели, т.к. считается, что основной размер КЭ не должен превышать $1/20$ от характер-

ного размера модели. В схеме применены как призматические КЭ с треугольным основанием (при моделировании откоса), так и параллелепипеды (при моделировании земляного полотна и основания). Призматические КЭ с треугольным основанием проверены по условиям вырожденных и «игольчатых» элементов, углы треугольника не менее 60° . На схему наложены граничные условия: 1) понизу модели запрет перемещения по всем трем осям X , Y и Z , 2) по бокам основания – запрет по осям X и Y , 3) по поперечным сторонам модели – запрет по оси Y (условия плоской деформации). Верх и откосы моделей от граничных условий свободны.

Деформационные характеристики выбраны из таблиц в соответствии с исследованными грунтами земляного полотна:

Слой 1 – суглинок насыпи, плотность $\rho = 2,0$ т/м³, модуль упругости $E = 25$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$;

Слой 2 – щебень, плотность $\rho = 2,4$ т/м³, модуль упругости $E = 100$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$;

Слой 3 – железобетон шпалы, плотность $\rho = 2,5$ т/м³, модуль упругости $E = 106$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$.

Представленный слоистый массив повторяет с незначительными отклонениями реальное земляное полотно, но толщина слоев принята постоянной, хотя в действительности она незначительно изменяется.

В качестве нагрузки модели был принят локомотив, который находится одной парой колес над шпалой, то есть $P = 25$ т. Давление на ось принято равным нормативному давлению от локомотива ($P = 20$ т) с учетом коэффициента динамичности $\mu = 1,25$. Была принята одна схема загрузки КЭ-модели – локомотив находится на двух путях. На рис. 1. показано расположение нагрузок на основной площадке насыпи. Нагрузка на ось распределена по ширине шпалы, на которую она приходится, причем оно распределена на 12-ти узлах КЭ, входящих в геометрическое места размещения шпалы и составляет 20,83 кН ($250/12 = 20,83$ кН).

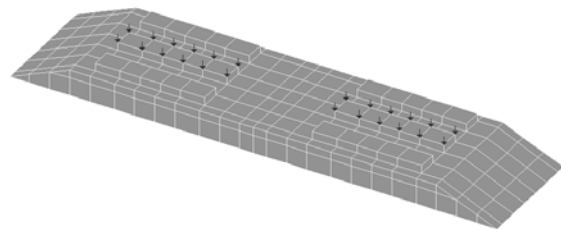


Рис. 1. Расположение нагрузок на верхнее строение пути (ВСП)

Все геометрические размеры и общие нагрузки на модель сохраняются и контролируются в ходе выполнения расчета, что возможно в примененном расчетном комплексе. При расчете МКЭ применялся мультифронтальный метод разложения матрицы жесткости с автоматической оптимизацией ширины ленты, как наиболее прогрессивный метод работы с матрицами, который применен в комплексе SCAD.

Результатами расчета являются общие перемещения и напряжения в модели по осям X и Z , причем следующие результаты показывают характерную картину их распределения в земляном полотне. Перед тем как перейти к анализу полученных результатов и выбору оптимального решения реконструкции, следует отметить, что в конечно-элементной модели сплошной вырезки не был учтен элемент гео-

синтетического материала. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, полотно геосинтетических материалов при пространственной постановке, при которой модель создается из объемных конечных элементов, из-за различной метрики (полотно – 2D, а земляное полотно – 3D) некорректно взаимодействует с земляным полотном. Во-вторых, первое сравнение полученных результатов свидетельствует о том, что и без усиления геосинтетическим материалом, разница между вариантами незначительна и влияние геосинтетика идет в запас прочности. Результаты расчета деформаций в различных вариантах земляного полотна с поездной нагрузкой (представлена только половина модели, что обосновывается симметрией схемы и нагрузки) представляют собой симметричные картины распределения (рис. 2).

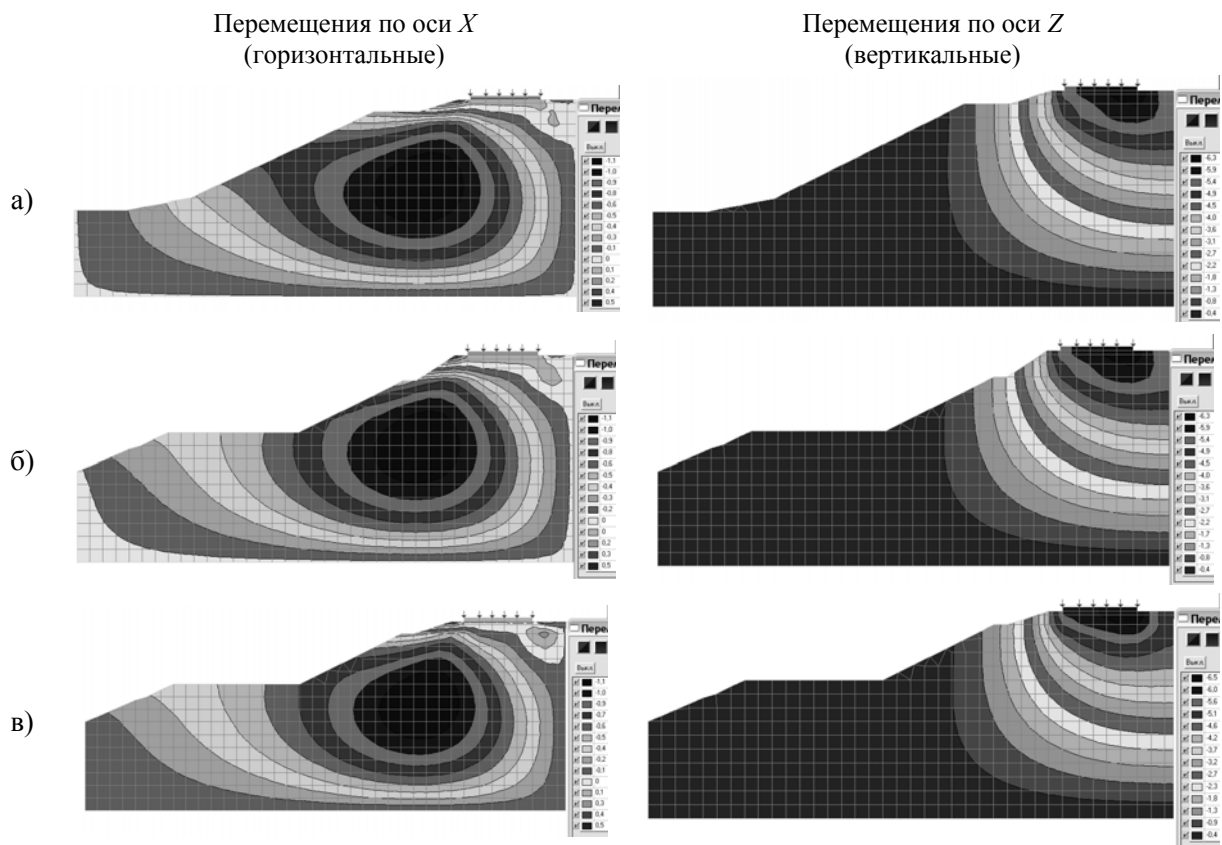


Рис. 2. Изолинии и изополя деформаций в земляном полотне: а) до реконструкции; б) сплошная вырезка; в) бортовая вырезка

Анализ перемещений по оси X позволил заключить, что количественно все три случая (до реконструкции и два варианта реконструированного земляного полотна) не имеют значительных изменений: максимальные горизонтальные перемещения составляют 1,1 мм. Следует отметить, что при количественной тождественности результатов, качественно они отличаются, что видно при сравнении распре-

деления изополей и изолиний. В случае сплошной вырезки изополя горизонтальных напряжений на линии симметрии модели не сливаются в сплошное поле. Следовательно, при действии двух локомотивов, находящихся на соседних путях, в случае сплошной вырезки их влияние действует только на соответствующий путь. В случае же бортовой вырезки ниже правого конца шпалы образуется замкнутая зона со значе-

нием 0,3 мм, которая отсутствует как в случае насыпи до реконструкции, так и в случае сплошной вырезки. Это объясняется тем, что поперечный профиль земляного полотна после реконструкции значительно изменился. Однако значения горизонтальных перемещений в случае бортовой вырезки малы и не позволяют судить о каких-то негативных последствиях. Перемещения по оси Z почти идентичны качест-

венно и количественно: максимальные вертикальные перемещения составляют 6,3 мм (в случае бортовой вырезки – 6,5 мм). Такие значения перемещений являются нормативными и свидетельствуют, что все три модели практически идентичны. Напряженное состояние в различных вариантах земляного полотна также представляется характерным и отличается симметрией распределения (рис. 3).

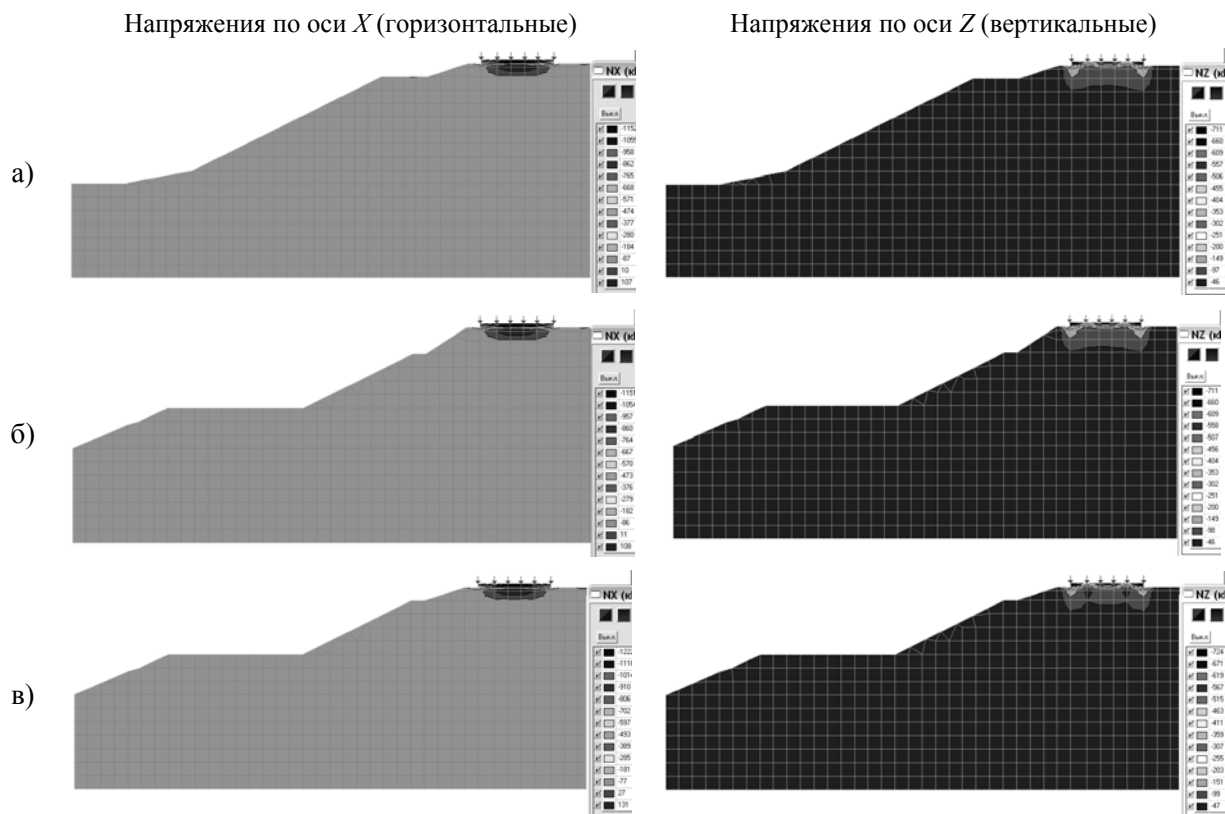


Рис. 3. Изолинии и изополя нормальных напряжений в земляном полотне:
а) до реконструкции; б) сплошная вырезка; в) бортовая вырезка

При анализе напряжений по оси X установлено, что они являются почти идентичными, что объясняется незначительной зоной их распространения (около 0,5 м под шпалой) и минимальным влиянием технических решений. Вместе с тем, можно отметить, что в зоне растяжения под рельсом в случае бортовой вырезки напряжения несколько увеличены (+0,13 МПа в отличие от +0,1 МПа в случае сплошной вырезки), но незначительно.

Анализ напряжений по оси Z показывает, что они также являются почти идентичными, но зона их распространения увеличивается (около 0,9...1,0 м под шпалой), поэтому следует учитывать, что в случае бортовой вырезки увеличивающиеся напряжения достигают суглинка земляного полотна, поскольку толщина щебня уменьшена от 1,0 до 0,4...0,5 м. Однако величины напряжений незначительны и со-

ставляют сотые доли мегапаскаля. Поэтому можно отметить, что нормальное эксплуатационное состояние земляного полотна будет обеспечено.

По выполненной работе можно сделать следующие выводы:

1. Проведено технико-экономическое сравнение обоих вариантов реконструкции земляного полотна на основе специализированного комплекса АВК-3 и установлено, что сметная стоимость строительства с учетом основных объемов работ и материалов при выполнении работ по бортовой вырезке составляет – 1235,9 тыс. грн. Вместе с тем сметная стоимость строительства с учетом основных объемов работ и материалов при выполнении работ по сплошной вырезке составляет – 3868,3 тыс. грн, что в три раза дороже по сравнению с бортовой вырезкой.

2. Разработаны конечно-элементные модели земляного полотна до реконструкции и по двум вариантам реконструкции, проведены их расчеты и в результате получены параметры напряженно-деформированного состояния земляного полотна, которые позволили оценить с позиции прочности влияние обоих технических решений.

3. Анализ НДС свидетельствует о том, что при реконструкции можно применять оба технических решения, которые являются почти идентичными, и вариант как сплошной, так и бортовой вырезки целесообразны с позиции НДС и условий последующей эксплуатации. Также анализ НДС позволил заключить, что при «сплошной» вырезке в данном конкретном случае усиления геосинтетическим материалом нецелесообразно.

4. Основным выводом после комплексного анализа является то, что вариант бортовой вырезки является оптимальным как по условиям

техничко-економического сравнения, так и с позиции прочности и устойчивости.

БИБЛІОГРАФІЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Інструкція з утримання земляного полотна залізниць України [Текст] / Л. І. Дяченко, П. П. Кислий, В. О. Кулач. Затверджено наказом Укрзалізниці від 08.05.2001 р. – К., 2001. – 60 с.
2. Фришман, М. А. Земляное полотно железных дорог [Текст] / М. А. Фришман, И. Н. Хохлов, В. П. Титов. – М. : Транспорт, 1972. – 287 с.
3. Карпиловский, В. С., SCAD для пользователя [Текст] / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер. – К. : ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
4. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К. : Сталь, 2002. – 600 с.

Поступила в редколлегию 09.12.2011.

Принята к печати 12.12.2011.

В. Д. ПЕТРЕНКО, А. М. М. АЛХДУР, О. Л. ТЮТЬКІН, В. В. КОВАЛЕВИЧ

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕРНІЗОВАНОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

У статті наведено результати аналізу напружено-деформованого стану земляного полотна при модернізації.

Ключові слова: земляне полотно, модернізація, протидеформаційні заходи

V. D. PETRENKO, A. M. M. ALKHDOUR, A. L. TIUT'KIN, V. V. KOVALEVICH

RESEARCH OF PARAMETERS OF THE MODERNIZED SUBGRADE

The article presents the results of analysis of the strained-and-stressed state for subgrade during its modernization.

Keywords: subgrade, modernization, anti deformation measures