

их долговечность.

В ИГТМ НАН Украины разработан электромагнитный привод стрелочных переводов, который рассчитан на эксплуатацию в условиях подземных рельсовых путей с троллейными электровозами.

Питание привода осуществляется напряжением +250 В от троллеи.

Электросоленоидные приводы со станцией управления на основе частотно-импульсного преобразователя были испытаны ИГТМ НАН Украины в условиях Гайского горно-обогатительного комбината (г. Гай Оренбургской области, Россия) и Криворожского железорудного бассейна с участием и активным содействием предприятия «Укрсвязьчермет».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников Ю.М. Электроприводы железнодорожной автоматики и телемеханики. – М.: Транспорт, 1985. – 288 с.
2. Рудничный транспорт и механизация вспомогательных работ / Под общ. ред. Б. Ф. Братченко. – М.: Недра, 1978. – 423 с.
3. Справочник по шахтному транспорту. Под ред. Г. Я. Пейсаховича и И. П. Ремезова. М.: Недра, 1977. 624 с.
4. Резников Ю.М. Современные отечественные и зарубежные стрелочные приводы и анализ их технических характеристик / Ю.М. Резников, В.С. Сагайтис // Автоматика и связь. – М., 1972. – Вып. 7 (73). – 50 с.
5. Резников Ю.М. Стрелочные электроприводы электротехнической и горочной централизации. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1975. – 152 с.
6. Говоруха В. В., Ладик С. Л. Создание автоматизированных систем управления стрелочными переводами рельсового транспорта: Монография. – Издательство ООО «Производственно-коммерческая фирма «Овантаж», 2005. - 230 с.

#### УДК 625.1

Канд. техн. наук В.В. Говоруха,  
инж. С.Ю. Семенов,  
инж. М.А. Ищук  
(ИГТМ НАН Украины)

#### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ, С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

У статті розглянуто дослідження напружено-деформованого стану елементів рельсового шляху, застосовуючи МСЕ.

#### RESEARCH STRESS FIELD OF RAIL WAY ELEMENTS USING FINITE ELEMENTS METHOD

The question of calculating stress field with FEM is shown in the article.

Железобетонные шпалы являются промежуточным элементом верхнего строения пути между рельсами и балластным слоем. Поэтому нагрузки, действующие на шпалу можно разделить на составляющие: внешние силы, передаваемые от рельса к шпале, и силы реактивного отпора балластного основания, противодействующие внешней нагрузке.

Существующие расчеты рельсового пути нормальной и узкой колеи основаны на методе расчета балок бесконечной длины на сплошном упругом основании. Этот подход позволил разработать простые инженерные методики и правила расчетов рельсового пути на прочность. Вместе с тем ряд допущений, упрощающих расчеты, приводит к отступлению от реальных условий работы рельсового пути в условиях шахт и карьеров.

Одним из таких допущений является рассмотрение рельсового пути как бесконечно длинной балки, расположенной на сплошном равноупругом основании. В действительности элементы рельсового пути, стрелочных переводов и съездов имеют конечную длину, а их опирание осуществляется на отдельные упругие опоры (шпалы, стрелочные брусья и др.). Вследствие этого, в применяемых методах не находят прямого отражения такие характеристики, как конкретная длина элементов пути; расстояния между упругими опорами; неравномерная жесткость основания в зоне отдельных опор и наличие зазоров между элементами; переменная ширина площади опирания по длине шпал или брусьев.

Поэтому указанные допущения не позволяют учитывать конструктивные изменения отдельных изделий путевой структуры и окружающих условий. Кроме того, они исключают возможность определения рациональных параметров элементов рельсового пути, стрелочных переводов и съездов, а также влияние условий опирания на реактивные силы, напряженно-деформированное состояние и устойчивость [1].

Неравномерность упругости основания имеет место и вдоль шпал или брусьев, что существенно сказывается на их работоспособности. Так, уменьшение жесткости основания под концевыми участками шпал приводит к увеличению жесткости в средней части, что вызывает трещинообразование железобетонных шпал и брусьев.

При рассмотрении задачи передачи нагрузки от рельса шпале можно предполагать, что рельс представляет собой балку конечной длины, лежащую на отдельных опорах, опирающихся на двухслойное основание. При этом один слой подчиняется гипотезе Винклера, другой рассматривается как упругое полупространство.

Для составления расчетных схем вводятся следующие предпосылки и допущения:

- рельсы, шпалы и другие элементы рельсового пути рассматриваются как балки конечной длины с постоянным и переменным сечением, расположенные на отдельных упругих опорах с постоянной или переменной жесткостью;
- расчетные элементы разделяются на отдельные участки с усредненными характеристиками моментов инерции и ширины площади опирания, а основание – на отдельные участки с усредненными характеристиками жесткости и геометрических размеров (ширина, толщина, длина);
- нагрузка от подвижного состава принимается статической и эквивалентной динамическим нагрузкам, а система нагрузок от ходовой части учитывается по принципу независимости действия сил;

– упругие свойства основания характеризуются пропорциональной зависимостью между нагрузками и перемещением, а также имеют свойства упругого полупространства;

– погонная масса условных участков принимается сосредоточенной в местах установки условных опор; основание под шпалами или брусьями, в почве выработки, земляном полотне или грунтовом массиве соответствует модели упругой сплошной среды для линейно-деформируемых тел.

При рассмотрении рельса, как балки на упругих опорах, необходимо учесть также осадку некоторых опор (шпал), вследствие неравной плотности подшпального основания и динамических нагрузок. В результате расчетная модель рельса представляет собой балку на опорах, с первоначальными различными зазорами (1,а). Зазоры между рельсом и шпалами можно заменить, учитывая различную степень загруженности шпал. В результате придем к расчетной схеме, изображенной на рисунке 1,б.

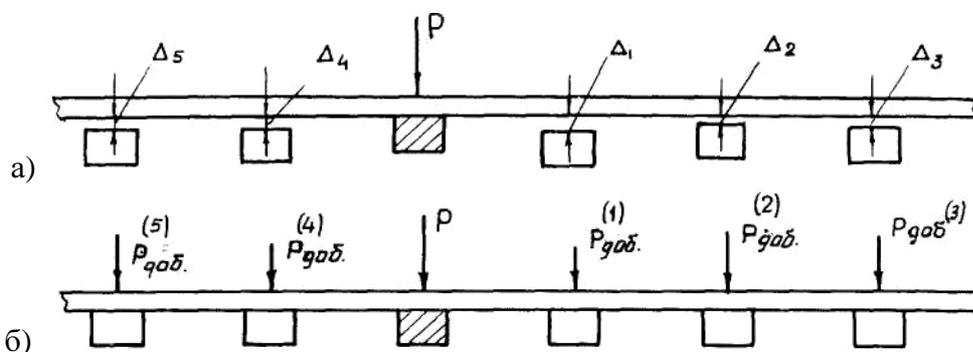


Рис. 1 - Эквивалентные схемы для расчета нагрузок на шпалы при наличии зазоров между рельсом и другими элементами верхнего строения пути:

а – схема эквивалентных зазоров;

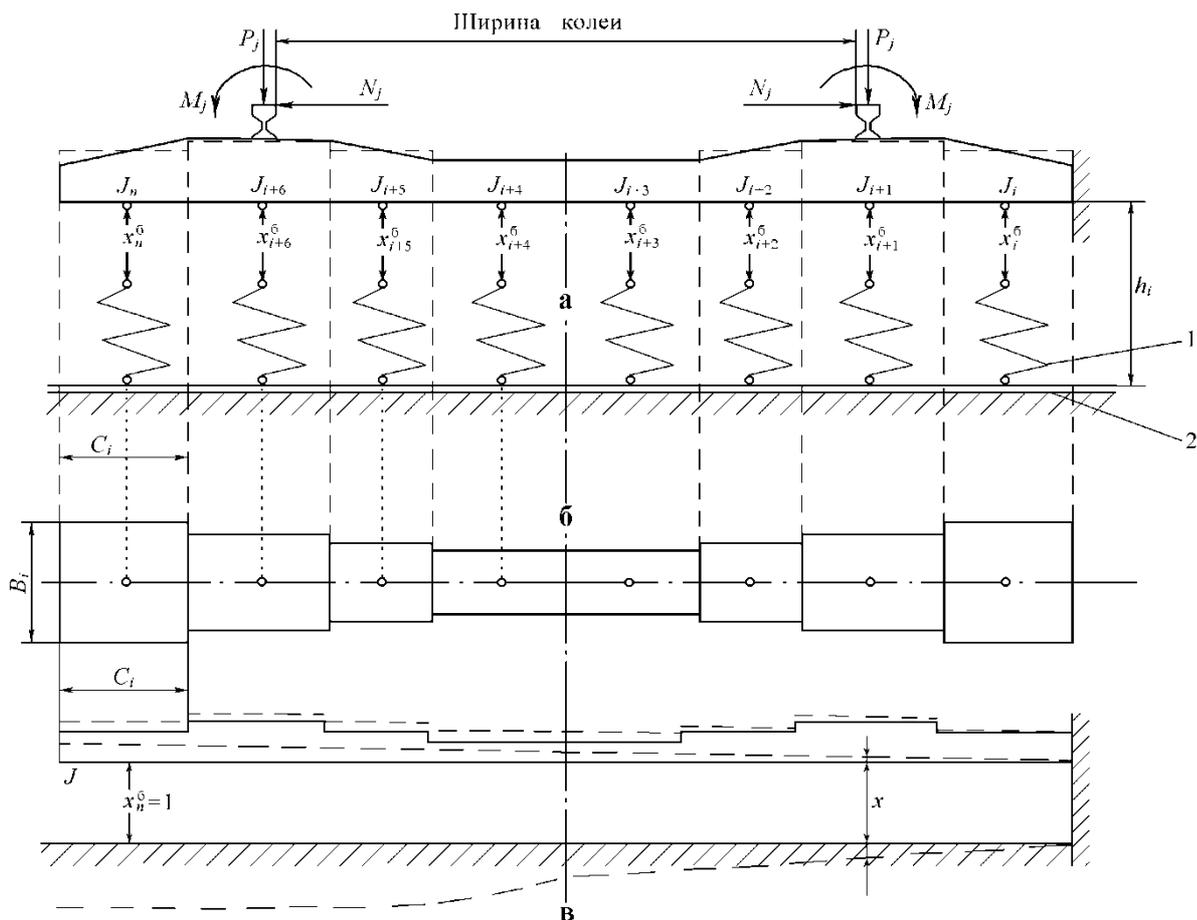
б – схема эквивалентных сил, заменяющих действие зазоров.

На рисунке 2 представлена расчетная модель для шпал.

Очевидно, что при проведении расчетов, важно получение наиболее точных результатов, а существующие методы не всегда имеют необходимую точность. Поэтому довольно актуальной является усовершенствование существующих и разработка новых более совершенных и более точных методов расчета конструкций, работающих в состоянии пластических деформаций.

Необходимо создавать алгоритмы, которые могли бы использоваться для очень широкого класса задач. При этом необходимо постоянно проверять полученные результаты с результатами экспериментов. Это позволяет определить ошибки в алгоритме и подсказать пути к их устранению.

Среди современных численных методов [2] решения инженерных и физических задач можно выделить методы конечных и граничных элементов (МКЭ, МГЭ). Они очень эффективны и охватывают огромный круг задач: от анализа напряжений в конструкциях самолетов и автомобилей до расчетов таких сложных конструкций как атомная электростанция [3].



а – вид сбоку; б – вид сверху; в – перемещение (деформация) балки и основания;  
 1 – упругий слой; 2 – упругое полупространство  
 Рис. 2- Расчетная схема для шпал:

Они требуют сложных вычислений, поэтому их применение было связано со значительными трудностями. Однако быстрое развитие ЭВМ позволило значительно уменьшить стоимость расчетных работ, поэтому на сегодня эти методы являются очень популярными почти в каждой отрасли современной науки.

Метод конечных элементов является аналитической процедурой, ключевая идея которой заключается в том, что сплошное пространство моделируется путем разбиения его на области (конечные элементы). В каждой из этих областей поведение пространства описывается при помощи отдельного набора выбранных функций, которые являются напряжениями и перемещениями в данной области.

Для каждого элемента составляется локальная матрица жесткости, которая входит в состав глобальной. После получения матрицы жесткости полученная система линейных алгебраических уравнений решается любым известным методом. В результате получаем перемещения в узлах. Учитывая, что  $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ , можно определить деформации. Используя закон Гука,

вычисляются напряжения.

Этот метод достаточно широко апробирован и на практике доказал свою применимость в самых различных областях. Существует значительное количество программ, позволяющих выполнять расчет с использованием МКЭ. Они включают в себя предпроцессор, который обеспечивает подготовку исходных данных для численного решения граничных задач механики, и постпроцессор для визуализации полученных результатов.

Математическая модель, моделирующая задачу, должна отображать основные явления, возникающие вследствие возникновения концентрации напряжений и возможного сопутствующего изменения физико-механических свойств окружающих элементов.

Для определения напряженно-деформированного состояния в шпале, необходимо знать распределение отпора подшпального основания. Для аналитического определения этого распределения предположим, что шпала представляет собой набор балок с различной величиной момента инерции сечения, толщиной, высотой [4]. После сложных математических выкладок получим эпюру давления на основание шпалы, представленную на рисунке 3 [1].

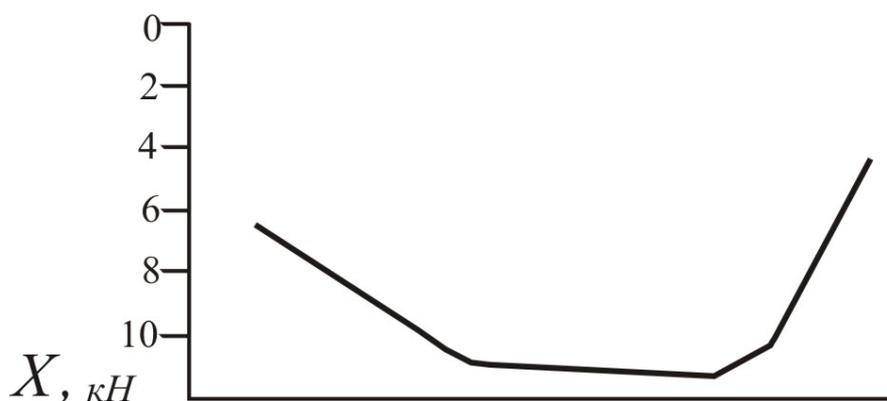


Рис. 3 - Эпюра давления на основание шпал (кг/мм<sup>2</sup>)

Применяя МКЭ, нет необходимости разбивать шпалу на отдельные участки. Спроектировав ее точную геометрию, разбив на нужное количество конечных элементов, можно получить решение, отличающееся от аналитического на доли процента.

Упругие параметры грунта для расчета рельсошпальной решетки были взяты с учетом работы [5]. При этом модуль Юнга принимался в пределах  $86 \div 194 \cdot 10^6$  МПа, а плотность  $\rho = 1,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Нагрузка на шпалу со стороны рельса в случае расчета лишь шпалы предполагалась завышенной и равной 50 т.

Ниже приведено распределение реактивных усилий со стороны грунта, напряженное состояние и деформации шпалы.

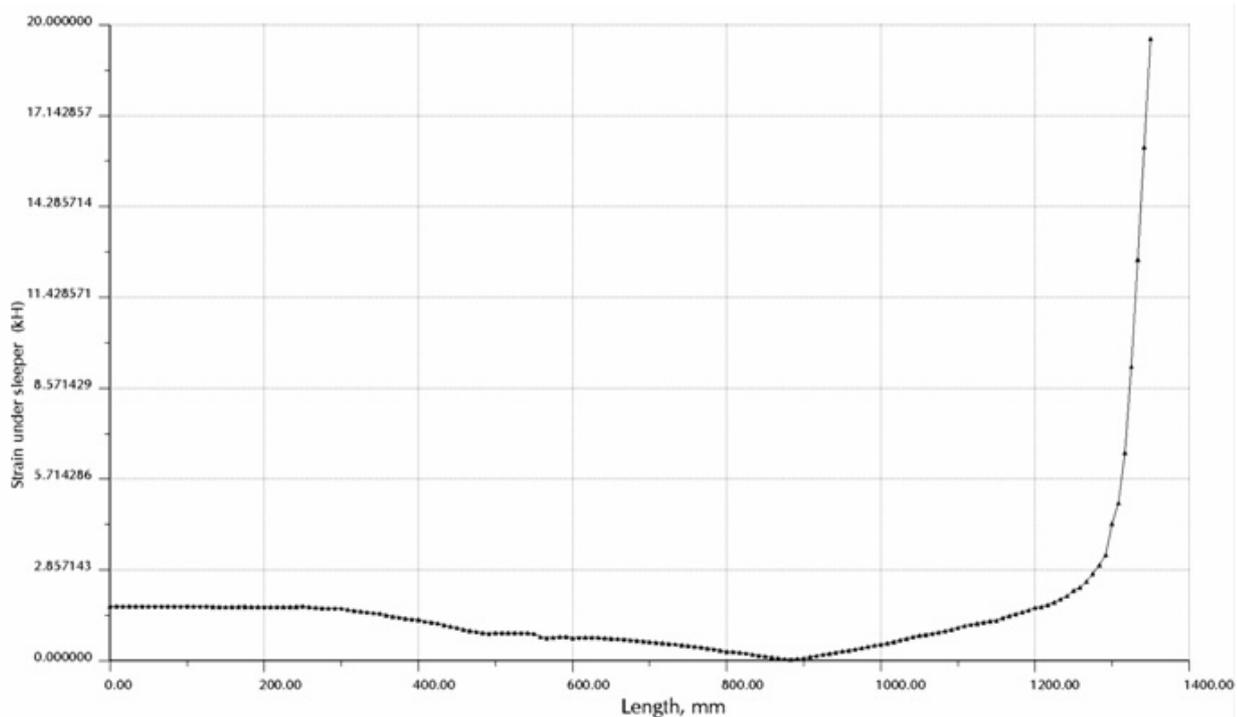


Рис. 4 – Распределение реактивных усилий

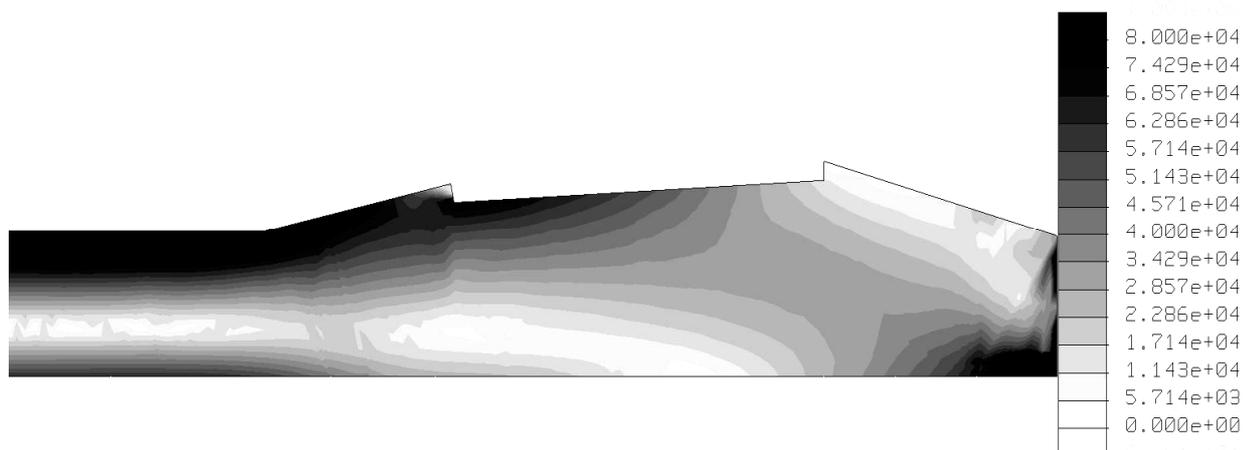


Рис. 5 – Распределение напряжений по шпале (кг/мм<sup>2</sup>)

Проведенные расчеты показывают, что конечно-элементный подход дает качественную картину распределения напряжений и прогибов сложных конструкций рельсошпальной решетки. Полученное поле перемещений позволяет пересчитать НДС тела в любой точке конструкции рельсового пути. По результатам расчета можно проектировать новые или оптимизировать уже имеющиеся конструкции элементов рельсового пути.

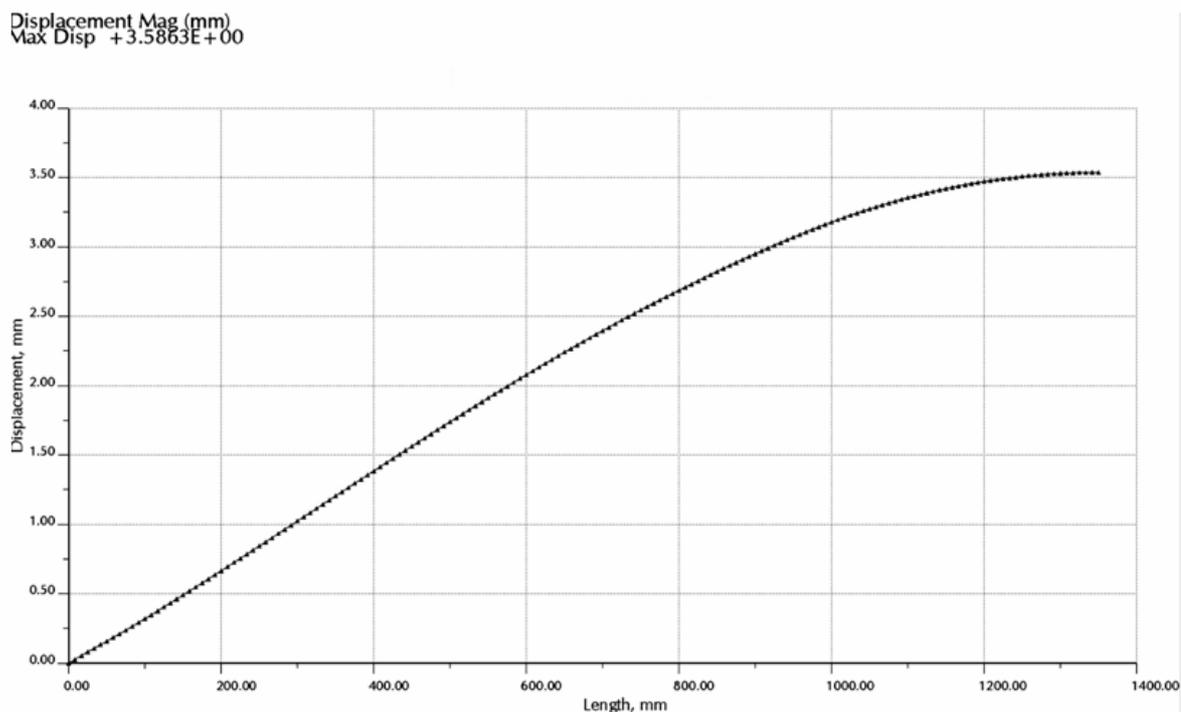


Рис. 6 - Распределение деформаций по шпале (мм)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Говоруха В.В. Механика взаимодействия рельсового пути, подвижных транспортных средств и смежных устройств: Монография. – Дн-ск: Лира, 2006. – 448 с.
2. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. – М: Мир, 1989. – 510 с, ил.
3. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
4. Говоруха В.В. Механика деформирования и разрушения упругих элементов промежуточных рельсовых скреплений: Монография. – Дн-ск: «Ли́ра ЛТД», 2005. – 388 с.
5. Озмидов О.Р. Развитие теории и совершенствование технологии контроля устойчивости грунтовых дамб накопителей промышленных отходов методами инженерной геофизики: Диссертация: на правах рукописи. Москва 2002, 58 с.