

## УЧЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ МАТЕРИАЛА В РАСЧЕТЕ ОСАДОК ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ

Е. А. СИГАЙ, Д. И. БОЧКАРЕВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В инженерной практике часто встречаются балки, лежащие на сплошном упругом основании. К таким конструкциям можно отнести шпалы железнодорожного пути, ленточные фундаменты зданий, опирающиеся на грунт и т.д.

Железнодорожная шпала может быть рассмотрена в виде линейно-упругой балочной плиты на упругом физически нелинейном двухслойном основании, находящейся под действием двух сосредоточенных нагрузок  $P$ , передаваемых от рельсовых нитей, и характеризующейся следующими параметрами: ширина  $2l$ , высота  $h$ , изгибная жесткость  $EJ$ .

Нижнее строение пути моделируется в виде прямоугольной расчетной области, размеры которой: по оси  $x$  – ширина  $2L$ ; по оси  $y$  – глубина  $h_2$ . Область щебеночного балласта имеет размеры:  $2L$ ,  $h_1$  и расположена между плитой и нижним строением пути. Для шпалы (плиты) справедливы гипотезы теории изгиба.

Модуль деформации  $E_0$  зависит от интенсивности деформаций, изменяется функционально в неявном виде. Коэффициент Пуассона принимается постоянным, так как его влияние на характеристику деформационных свойств грунта менее значительно.

Граничные условия задачи: на границах принятой расчетной области перемещения в направлениях осей  $x$  и  $y$  принимаются равными нулю; в контактной зоне справедливо равенство осадок основания прогибам плиты. В контактной зоне шпалы с балластным слоем возникают нормальные реактивные давления, а также силы трения. Основание аппроксимируется симметричной разбивочной сеткой с постоянным шагом по осям:  $x - \Delta x$ ,  $y - \Delta y$ .

Для решения контактной задачи с применением вариационного метода в нелинейном расчете используется функционал полной энергии, величина которого получена суммированием функционала энергии деформаций упругого основания  $U_f$ , функционала энергии изгиба балочной плиты  $U_b$  и потенциала работы внешней нагрузки  $P$ .

Решение контактной задачи строится в перемещениях и реализуется численно методом конечных разностей (МКР), то есть заменой дифференциальных уравнений линейными конечно-разностными соотношениями. Энергия деформаций упругого основания получается суммированием по объему основания энергий деформаций прямоугольных участков для каждой ячейки МКР. Энергия изгиба балочной плиты в контактной зоне с основанием и потенциал работы внешних сил записывается также в конечно-разностном виде. В результате система дифференциальных уравнений заменяется системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Вначале решается задача в линейной постановке. По вычисленным значениям перемещений  $i$ -той узловой точки  $u_i(x)$ ,  $v_i(y)$  используя геометрические уравнения и конечно-разностные соотношения, определяется интенсивность деформаций и интенсивность напряжений в центрах ячеек.

Имея значения напряжений и перемещений, полученных в результате решения задачи в первом приближении, определяется касательный модуль деформации для каждой ячейки, и задача решается во втором и последующих приближениях. Итерационный процесс заканчивается, как только разница между последующим и предыдущим приближением исследуемой функции будет соответствовать требуемой точности.

Критерием сходимости служит условие, чтобы максимальная поправка  $\delta$ , по искомой функции  $f(x, y)$  за один обход сетки не превосходила малой величины  $\xi$ , зависящей от шага сетки, полной осадки шпалы и наличия ослаблений.

Для реализации указанного подхода составлена программа на языке Mathematica 8.0 и проведена ее числовая апробация при использовании следующих исходных параметров: 1-й слой основания (щебеночный балласт) –  $\sigma_{y1} = 40$  МПа,  $\nu_1 = 0,27$ ,  $E_{01} = 200$  МПа; 2-й слой основания (песок средней крупности) –  $\sigma_{y2} = 0,25$  МПа,  $\nu_2 = 0,33$ ,  $E_{02} = 30$  МПа; железобетонная шпала –  $P = 100000$  Н;  $E = 2,35 \cdot 10^{10}$  Па. При линейном расчете величина осадки шпалы составила 2,8 мм, а при нелинейном – 8,2 мм, что отличается более чем в 2 раза.

Результаты расчета демонстрируют наличие распределительной способности основания (деформации и напряжения возникают не только под нагруженными участками, но и в соседствующих с ними участках). Эта способность полностью соответствует гипотезе упругого полупространства, подтверждается экспериментами и практическим опытом.

В результате предложен новый эффективный итерационный подход для расчета шпал на нелинейно-упругом неоднородном основании. Он основывается на свойстве минимума функционала полной энергии

системы «плита – основание». Этот подход позволяет полностью определить напряженно-деформированное состояние основания, исследовать контактную зону, вычислить внутренние усилия и осадки шпалы.

Преимущество вариационно-разностного подхода состоит в том, что граничные условия получаются автоматически при решении уравнений на границах области того же вида, что и внутри области. Различие разностных уравнений внутри области и на ее границе является одной из главных причин неустойчивости МКР. Кроме того, в получающемся решении компоненты перемещения изменяются от узла к узлу монотонно, без «гармошки», характерной для МКР.

Вычисления показали, что:

- а) применение вариационного подхода в решении контактной задачи вместе с физическими итерациями по А. А. Ильюшину приводит к быстрой сходимости расчета (максимум пять – шесть итераций);
- б) на скорость сходимости итерационного процесса влияет правильный выбор модели основания и вида функциональной зависимости между интенсивностями напряжений и деформаций;
- г) подтверждается наличие распределительной способности основания, поэтому в инженерных расчетах необходимо ее учитывать.

УДК 625.14+06

## СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

*И. С. СОРОЧКИНА*

*Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация*

В инфраструктуре Российских железных дорог путевое хозяйство занимает ведущее место. Основопологающим направлением безопасности является коренное изменение подходов к системе текущего содержания пути. Однако для эффективного функционирования системы технического обслуживания необходима информация о состоянии пути. Особую актуальность приобретает задача повышения информативности оценки состояния, создание и формирование базы данных состояния пути с целью анализа и прогноза изменений, определения необходимой периодичности контроля и потребности в ремонтно-путевых работах, исходя из фактического состояния объектов путевого хозяйства. Динамические нагрузки на путь при движении поездов вызывают в нем различные разрушающие процессы, которые приводят к необходимости регулярного выполнения работ по его текущему содержанию, а также замене отдельных элементов. Характерным отрицательным эффектом любого эксплуатационного процесса является интенсивный начальный износ участвующих в нем элементов, приводящий к раннему появлению дефектов, и функциональные ограничения, возникающие у этих элементов в конце срока службы и обычно сопровождающиеся интенсивным конечным износом.

Рельсы в эксплуатации подвергаются высоким нагрузкам со стороны подвижного состава. Для обеспечения безопасности движения необходимо с помощью соответствующих методов контроля своевременно обнаруживать и оценивать возникающие дефекты. Для этой цели используется ультразвуковая и вихретоковая дефектоскопия. Неразрушающий магнитный контроль, осуществляемый индукционным методом (вихретоковый метод), дает возможность обнаруживать места возникновения усталостных трещин на ранней стадии их зарождения.

Стрелочный перевод, вышедший из строя в связи с обледенением или снегопадом, способен вызвать серьезный сбой в движении поездов. Оснащение стрелочных переводов обогревателями уже в течение десятилетий является стандартом.

Большое влияние на качество и прочность железнодорожного пути оказывает щебеночный балласт. В связи с этим к нему предъявляется ряд особых требований. На качество балласта большое влияние оказывает наличие загрязнений. Один из наиболее опасных загрязнителей — мелкие фракции, образующиеся в результате истирания частиц щебня. Причины загрязнения балластного слоя могут быть следующими: недоброкачественный новый щебень, эксплуатационные нагрузки, перегрузка нижнего строения пути из-за недостаточной толщины балластного слоя, размягчение под действием влаги земляного полотна в результате недостаточного поперечного уклона защитного слоя, отсутствие дренажа, увеличение доли мелких фракций вследствие перегрузки нижнего строения пути, попадание мелких фракций в балласт при перевозке грузов, осадение мелких фракций из воздуха, работы по текущему содержанию и ремонту пути. Новые системы верхнего строения балластного пути позволяют снизить эксплуатационные расходы и общие затраты жизненного цикла, повысить качество инфраструктуры и снизить нагрузки на окружающую среду. Кроме того, некоторые из этих систем увеличивают сопротивление пути поперечному сдвигу в крутых кривых, препятствуют выбросу щебня с поверхности балластной призмы и повышают устойчивость последней к механическим нагрузкам.