

УДК 004.056

С.И. Сахарчук, В.А. Федорова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ И ДВУХСЛОЙНЫХ СИСТЕМАХ

Предложены геоинформационная модель, алгоритм и программа позволяющие учитывать величину и количество воздействий поездных напряжений на основной площадке, сопротивляемость накоплению остаточных деформаций и состояние грунтов земляного полотна, прогнозировать изменение состояния земляного полотна.

Ключевые слова: моделирование, геоинформационные системы, алгоритм, железные дороги, контактная сеть, программа.

Введение. В качестве интегрального показателя несущей способности подрельсового основания на всех железных дорогах мира используют распределенную по протяжению рельсовой нити его жесткость, названную модулем упругости подрельсового основания. Этот показатель интегрально характеризует густоту укладки и жесткость шпал, толщину и плотность балластного слоя, а также деформативность (податливость) земляного полотна. На протяжении всего периода существования железных дорог во всем мире стремились увеличить несущую способность подрельсового основания за счет более густой укладки и увеличения жесткости шпал, увеличения толщины и плотности, а значит, и жесткости балластного слоя и снижения податливости (увеличения жесткости) земляного полотна путем его осушения и уплотнения. Этот процесс присущ всем железным дорогам мира и не только железным, но и автомобильным и аэродромным покрытиям, где для увеличения жесткости дорог применяют даже бетонное покрытие. Известно [1], что чем выше жесткость подрельсового основания, тем больше его прочность.

Однако вследствие наличия ползунов, выщерблин, наваров и других неровностей на колесах, а также рельсовых стыков, седловин, боксовин, волнообразного износа и других неровностей на рельсах динамическое (вибрационное) воздействие на жесткий путь возрастает.

Основные виды износа, остаточных деформаций и усталостных повреждений пути в целом и его элементов происходят в основном от воздействия колес грузовых поездов. Все указанные виды повреждений пути резко (нелинейно) возрастают с увеличением скорости.

Анализ существующих подходов накопления остаточных деформаций. Накапливаемые в процессе эксплуатации остаточные деформации основной площадки земляного полотна из-за пучения зимой и осадки (уплотнения) грунта летом являются основным показателем, влияющим на надежность пути в целом. Указанные деформации - это следствие действия многих факторов, в том числе неисправностей земляного полотна, устранение которых требует существенных трудовых и материальных затрат. Остаточные деформации основной площадки земляного полотна в процессе эксплуатации в основном определяются величиной и количеством воздействия поездных напряжений на основной площадке, а также сопротивляемостью накоплению остаточных деформаций, определяемой составом и состоянием грунтов верхней (деятельной) части земляного полотна. Естественно также, что состав и состояние (плотность, влажность) грунтов земляного полотна по его протяжению сильно изменяются. Состояние грунтов сильно изменяется и во времени (зимой, весной, летом и осенью).

Имеется ряд гипотез и теорий, позволяющих объяснить влияние отдельных факторов на накопление деформаций при прочих неизменных или мало изменяющихся условиях. Большинство из них относится к однократному приложению нагрузки. По мнению ряда специалистов [2], характер процессов, происходящих в грунтах при многократном приложении постоянной по величине нагрузки при прочих неизменных условиях, достаточно полно объясняется теорией Г.И. Покровского [3], согласно которой повторные нагрузки вызывают непрерывные перемещения частиц. После некоторого числа повторений на-

грузки частицы грунта принимают наиболее устойчивое взаимное расположение. При постоянной нагрузке конечная величина деформации согласно этой теории зависит от начальной плотности. Данные теории хорошо подтверждаются экспериментами при многократном нагружении грунта в замкнутом объеме.

На большинстве участков сети железных дорог наблюдаются сезонное промерзание грунта верхней части земляного полотна и его пучение (в том числе и равномерное). Все современные гипотезы, объясняющие процесс пучения [4], свидетельствуют о существенном увеличении содержания воды в пучащем слое и о разуплотнении грунта вследствие увеличения его объема из-за образования и постепенного увеличения линз и прослоек льда. В процессе их таяния и удаления избыточной влаги пучинистый слой грунта оседает за счет уплотнения под действием поездной нагрузки и собственного веса верхнего строения пути. Процесс уплотнения может длиться до следующего промерзания.

Эксперименты в натуральных условиях показали, что на стабилизированном эксплуатируемом земляном полотне деформации основной площадки из года в год накапливаются даже после пропуска за период наблюдений более 750 млн. т брутто груза. Накопление деформаций существенно зависит от величины поездных напряжений, действующих на основную площадку, и количества воздействий этих напряжений.

В подрельсовых зонах накопление годичных вертикальных деформаций основной площадки на стабилизированном эксплуатируемом земляном полотне может быть объяснено тем, что в период годового цикла, кроме вертикальных перемещений частиц грунта основной площадки, описываемых теориями уплотнения и переупаковки частиц [3] и гипотезами о пучении, также происходит горизонтальное остаточное перемещение частиц грунта из подрельсовых зон в сторону концов шпал и оси пути, т.е. в зоны с меньшим давлением на основную площадку.

Максимальное накопление деформаций протекает по направлению линии действия максимальных напряжений, т.е. по направлению линии действия главных напряжений. Направление этих напряжений в грунте при действии на него распределенной нагрузки, как известно, определяется градиентом нагрузки. В результате многолетних циклов уплотнения поездной нагрузкой в весенне-летний период и разуплотнения при пучении в зимний период указанные перемещения могут быть значимыми.

Данный процесс определяется причинами самого различного характера от гидрогеологиче-

ских и термических до механических.

Процесс накопления остаточных деформаций основной площадки, на основе которого разработана методика и получены расчетные формулы, может быть объяснен изложенными выше гипотезами. Многократно и надежно установлено, что повторяемость приложения определенной нагрузки на основную площадку земляного полотна вызывает большую деформацию, чем разовое приложение нагрузки большей величины [5].

В практических расчетах на эксплуатируемых участках пути используют эмпирические формулы, связывающие осадку s , мм, поверхности балласта и пропущенный тоннаж T , млн. т брутто. Например, для первой стадии синхронизации интенсивности деформаций характерно значительное уменьшение интенсивности развития остаточных деформаций с увеличением пропущенного тоннажа [6]:

$$s = \frac{T}{a_1 + b_1 T}. \quad (1)$$

Для второй продолжительной стадии стабилизации интенсивности деформаций характерна пропорциональная связь накопления остаточных деформаций с пропущенным тоннажем [6]:

$$s = a_0 T. \quad (2)$$

Здесь a_0 , a_1 , и b_1 – эмпирические положительные коэффициенты, характеризующие изменение прочностных характеристик пути в процессе многократного нагружения, которые определяются при аппроксимации экспериментальной зависимости $s(T)$ функции (1) или (2).

Засорение и увлажнение при неизменной поездной нагрузке снижают прочностные характеристики балласта за счет уменьшения коэффициента трения между частицами и аккумуляции влаги, поэтому формулы (1) и (2) дополняют на третьей стадии критического развития интенсивности остаточных деформаций степенной зависимостью вида

$$s = a_2 T^e.$$

Накопление остаточных деформаций на всех трех стадиях интенсивности развития остаточных деформаций можно описать двучленной формулой вида [6]

$$s = \frac{T}{a_1 + b_1 T} + a_2 T^e, \quad (3)$$

где a_1 , b_1 , a_2 , e – эмпирические коэффициенты, характеризующие изменение прочностных характеристик в процессе многократного нагружения, засорения и увлажнения балласта, которые определяются путем аппроксимации экспериментальной зависимости $s(T)$ на засоренных уча-

стках функцией (3).

Главный показатель накопления остаточных деформаций в балласте в процессе эксплуатации – величина динамических сил, передаваемых на балласт под поездами. Значение таких сил при прочих равных условиях зависит от эпюры шпал и, главное, от жесткости связи между балластом и рельсом [1].

Сила среднего значения давления на шпалу Q вычисляется по формуле

$$Q = \frac{1}{2} kl \sum \eta P,$$

где k – коэффициент относительной жесткости подрельсового основания и рельса; l – расстояние между осями шпал; P – сила давления колес на рельсы; η – ордината линии влияния.

Исследования показали, что накопление остаточных деформаций в подрельсовом основании можно рассматривать как процесс вибрационного внедрения шпал в балласт. Этот процесс характеризуется тем, что погружение какого-либо твердого тела в сопротивляющуюся среду происходит под действием сил двух видов: постоянной, или медленно меняющейся, и знакопеременной [7], причем наличие знакопеременной силы значительно ускоряет процесс внедрения. Это объясняется тем, что знакопеременная сила вызывает вибрации, которые приводят к снижению эффективных коэффициентов сухого трения между телами. В результате резко уменьшается сопротивление тел относительно смещению, вызываемому постоянными или медленно меняющимися силами (например, сыпучая среда под влиянием вибраций становится подобной вязкой жидкости, т. е. частицы ее приобретают большую подвижность).

Применительно к накоплению остаточных деформаций в балласте под шпалой этот процесс можно представить следующим образом. Погружаемым телом является шпала, сопротивляющейся средой – балластный слой. На шпалу передается некоторая доля динамического давления колеса на рельс. Есть основания предположить, что вибрации оказывают существенное влияние на эффективный коэффициент внутреннего трения щебня, а следовательно, и на процесс накопления остаточных деформаций. С уменьшением коэффициента внутреннего трения увеличивается подвижность частиц щебня, создаются более благоприятные условия для выжимания его из-под шпалы в сторону шпальных ящиков и откоса балластной призмы. Это приводит к интенсификации накопления остаточных деформаций. В Японии считают, что вибрации балластного слоя являются одним из определяющих факторов в накоплении остаточных де-

формаций. Изменение сопротивления балласта продольному сдвигу пути при действии вертикальных вибраций, возникающих при прохождении поездов, отмечено Э.В. Сикмейером. Он указывает, что вертикальные вибрации снижают это сопротивление до 50 %. Из приведенного краткого обзора имеющихся данных вытекает, что вибрации, действующие в пути, оказывают существенное влияние на устойчивость балласта против накопления остаточных деформаций.

Поэтому представляется правомочным рассмотрение процесса накопления остаточных деформаций как вибрационного внедрения шпал в балласт. Анализ существующих решений по теории вибрационного внедрения показывает, что использовать какие-либо готовые решения применительно к накоплению остаточных осадков шпал не представляется возможным.

Создание нового решения наталкивается на значительные математические трудности. В связи с этим исследование влияния вибраций в балласте на накопление остаточных осадков наиболее целесообразно на данном этапе проводить экспериментальным путем.

Целью работы является поиск новых решений, позволяющих на основе геоинформационного моделирования прогнозировать накопление остаточных деформаций земляного полотна железной дороги и отклонение участка железнодорожного пути от номинальных параметров.

Постановка задачи. Приближенная оценка влияния вибраций на накопление остаточных осадков может быть выполнена следующим образом. В результате экспериментов получены зависимости интенсивности накопления остаточных осадков пути при железобетонных и деревянных шпалах от уклона неровностей, т. е. $y = \varphi(i)$. Предположим, что удалось выделить каким-либо образом из общей интенсивности накопления остаточных осадков ту ее часть, которая соответствует лишь удельным давлениям на балласт, возникающим при прохождении различных неровностей, без учета вибраций в балласте, т. е. $y_1 = \varphi_1(i)$. Тогда влияние вибраций можно учесть некоторым коэффициентом k^s , зависящим от параметров вибраций, и представить интенсивность накопления остаточных осадков пути в виде

$$y = \varphi_1(i) k^s. \quad (4)$$

Выделение доли интенсивности накопления остаточных осадков, соответствующей лишь удельным давлениям на балласт, можно произвести на основе исследований С.Н. Попова, которым были получены зависимости интенсивности накопления остаточных осадков от удельного давления на балласт. При установлении указанных зависимостей характер нагрузки на шпалы

соответствовал приложению весовой составляющей давления колеса на рельс; влияние сил, обусловленных неровностями, отсутствовало. Оказалось, что при удельных давлениях на балласт меньше допускаемых $[\sigma_6]$ интенсивность накопления остаточных осадок изменяется примерно прямо пропорционально удельным давлениям. Если же они превосходят $[\sigma_6]$, то рост осадок значительно опережает увеличение удельных давлений.

Учитывая прямую пропорциональную зависимость между удельными давлениями и интенсивностью накопления остаточных осадок, составим уравнения $y_i = \varphi_1(i)$ для пути с деревянными и железобетонными шпалами. При этом исходным значением интенсивности накопления остаточных осадок будет ее величина при отсутствии неровностей на рельсах. По данным Попова С.Н., она составляет 0,10 – 0,12 мм/млн т.

Зависимость коэффициента k^e от уклона неровностей (т. е. от их размеров) дает возможность выразить его через ускорения в балласте, которые также определенным образом зависят от уклона неровностей. Поскольку зависимость ускорений в балласте от уклона наиболее отчетливо выражена для ускорений, направленных вниз, коэффициент k^e целесообразно представить в виде функции этих ускорений, т. е. $k^e = f(w)$. При этом следует учитывать, что при отсутствии неровностей $k^e = 1$, т.е. влияние вибраций отсутствует.

Расчеты показывают, что зависимость коэффициента k^e от ускорений в балласте, направленных вниз, можно аппроксимировать следующими уравнениями:

при железобетонных шпалах

$$k_{\text{ж}}^e = 1 + 0,5 \left(\frac{w_{\text{ж}} - w_{\text{ож}}}{w_{\text{ож}}} \right)^{1,6};$$

при деревянных шпалах

$$k_{\text{д}}^e = 1 + 0,4 \left(\frac{w_{\text{д}} - w_{\text{од}}}{w_{\text{од}}} \right)^{1,2},$$

где $w_{\text{д}}$ – ускорения в балласте возле шкалы на уровне нижней постели, направленные вниз, возникающие при прохождении колесами неровности на рельсе; $w_{\text{од}}$ – ускорение в балласте при отсутствии неровности.

В случае если $w_{\text{д}} < w_{\text{од}}$, то разность $w_{\text{д}} - w_{\text{од}}$ следует принимать равной нулю, т. е. $k^e = 1$.

Подставив выражения для k в формулу (4) и сделав некоторые преобразования, получим:

$$y_{\text{ж}} = 0,12P_{\text{ж}} + 0,060P_{\text{ж}} \left(\frac{w_{\text{вж}} - w_{\text{вож}}}{w_{\text{вож}}} \right)^{1,6},$$

$$y_{\text{д}} = 0,12P_{\text{д}} + 0,048P_{\text{д}} \left(\frac{w_{\text{ВД}} - w_{\text{ВОД}}}{w_{\text{ВОД}}} \right)^{1,2},$$

где y – интенсивность накопления остаточных осадок пути с железобетонными (индекс "ж") и деревянными (индекс "д") шпалами, мм/млн т; P – удельное давление шпал на балласт, кгс/см²; $w_{\text{ВД}}$, $w_{\text{ВОД}}$ – вертикальные ускорения в балласте, направленные вниз, м/с².

Далее по полученным формулам и статистическим данным строятся модели накопления повреждений (МНП).

На основании выше изложенного можно сделать вывод об актуальности прогнозирования накопления повреждений на основе геоинформационной модели.

Моделирование накопления деформаций.

При моделировании накопления деформаций используется картографическая модель. Она представляет собой электронную карту, содержащую тематический слой режимов эксплуатации участка пути, построенный на основе слоя «Нагружение». Используя тематический слой, можно определить, сколько времени участок пути находился в обычном и форсированном режимах нагружения. В связи с тем, что в последнее время геоинформационные системы (ГИС-технологии) получили интенсивное развитие и все более различные данные включаются в состав ГИС, процесс получения тематического слоя режимов можно автоматизировать. Оператору нужно лишь указать участок пути на базовом слое «Нагружение», а данные о том, сколько времени участок эксплуатируется в обычном или форсированном режиме нагружения, собираются автоматически на основе указанного участка и тематического слоя режимов. Такой подход позволяет значительно упростить (а следовательно, и снизить трудозатраты) процесс получения данных о времени эксплуатации участка в различных режимах нагружения.

Разработанные алгоритмы для оценивания накопления повреждений основаны на аддитивно-Марковских моделях накопления повреждений (МНП), предполагающих гипотезу о линейном суммировании повреждений и удовлетворяющих следующим условиям:

– условие аддитивности означает, что ресурс аддитивно утрачивается во времени;

– условие марковости означает, что текущее значение ресурса зависит от величины выработанного ресурса в прошлом и не зависит от того, каким образом он выработан (в каком режиме ϵ).

Для осуществления оценки долговечности

участка при переменном режиме нагружения необходимы следующие входные данные.

1. Статистика наработки на отказ участка пути в обычном $\xi(\varepsilon_1)$ и форсированном $\xi(\varepsilon_2)$ режимах нагружения.

2. Программа нагружения, т.е. данные о времени эксплуатации участка пути в переменном режиме. Эти данные получаются на основе тематического слоя режимов. Они представляют собой картографическую информацию в виде областей, которые соответствуют режимам эксплуатации. Для получения программы нагружения необходимо знать маршрут движения объекта на карте. Этот маршрут будет пересекать области тематического слоя режимов и соответственно определять программу нагружения.

Полагаем, что между моментами отказов участка пути $\xi(\varepsilon_i)$ и $\xi(\varepsilon_j)$ в режимах ε_i и ε_j соответственно существует инвариантная функциональная зависимость:

$$\xi(\varepsilon_i) = \varphi_{ij}(\xi(\varepsilon_j)).$$

Для определения параметров данной функциональной зависимости используются модифицированный метод моментов и модифицированный метод максимального правдоподобия соответственно.

Таким образом, при известной программе нагружения возможен пересчет от наработки на отказ объекта в режиме ε_2 к наработке на отказ в стационарном режиме ε_1 .

Пересчет начинается с последней точки цикла и производится последовательно для каждого отрезка по следующим формулам:

$$\xi_1 = \xi(\varepsilon_1) = \varphi_{12} \dots (\varphi_{12}^{-1}(\varphi_{12}^{-1}(\tau_m) + \tau_{m-1}) + \tau_{m-2}) + \dots + \tau_1,$$

где ξ_1 – момент отказа в стационарном режиме ε_1 .

Для режима ε_2 необходимо произвести дополнительное вычисление по формуле

$$\xi_2 = \varphi_{12}^{-1}(\xi_1).$$

Сравнивая полученный результат со статистикой контрольной выборки – математическое среднее наработок до отказа в стационарном режиме ε_1 (или ε_2), можно сделать вывод об утрате ресурса.

Следует отметить, что в случае если число режимов в программе нагружения больше двух, то принцип пересчета остаётся неизменным. Но для его осуществления необходимо иметь статистику наработки на отказ участка пути в этих режимах и оценку параметров соответствующих функциональных зависимостей φ_{ij} .

В результате вышеописанного пересчета мы получим значение утраты ресурса в стационарном режиме ε_1 . Для участка пути это значение будет соответствовать утрате ресурса за один рейс по заданному маршруту. Зная число рейсов в день, можно прогнозировать дату отказа кон-

кретного участка пути.

Поскольку картографические данные, используемые в разработанном программном комплексе, должны находиться в формате ГИС MapInfo, которая работает под управлением операционной системы Windows, выбор языка программирования первоначально был сделан в пользу среды разработки приложений Map Basic, имеющей следующие достоинства:

- Map Basic позволяет каждому пользователю построить свою ГИС, ориентированную на решение конкретных прикладных задач;

- Map Basic поддерживает обмен данными между процессами (DDE, RPC, XCMD, XFCN), включение в приложения запросов SQL с географическим расширением;

- вызов динамических библиотек (DLL) или исполняемых программ (EXE) из Map Basic приложения;

- лёгкий доступ к данным и, как следствие, отсутствие потребности переходного формата (прямое открытие файлов Excel, Access, Lotus 1-2-3, x Base и ASCII);

- запуск программы непосредственно из ГИС;

- Map Basic позволяет разработать собственные меню, на панели инструментов и диалоги, упрощающие работу конечного пользователя с геоинформацией;

- Map Basic – язык мультиплатформенный, модульный, процедурный, позволяющий управлять событиями.

Однако наряду с перечисленными достоинствами есть и недостатки, препятствующие реализации:

- ограниченность языка Map Basic по сравнению с другими языками программирования (Visual Basic, Delphi, C++);

- невозможность создания гибкого и оптимального кода;

- отсутствие реализации технологии объектно-ориентированного программирования.

Так как реализация предполагает осуществление программного вычисления достаточно сложных математических выражений, то выбор языка Map Basic в качестве базового является нерациональным. Поэтому в качестве основного языка программирования выбираем Visual Basic.

Выводы. Результаты расчета интенсивности накопления остаточных осадков по полученным формулам в зависимости от уклона неровностей представлены в таблице (в числителе). При расчетах использованы статистические данные. В той же таблице для сравнения приведены значения интенсивности накопления остаточных осадков, полученные в результате геоинформационного моделирования (в знаменателе).

Как видно из таблицы, сходимость результатов получилась удовлетворительной.

Исходными данными для моделирования являются модели накопления повреждений, тематические слои цифровой карты, нагруженность участка пути, статистические данные, климатические данные.

Род шпал	Интенсивность накопления остаточных осадок, мм/млн т.				
	0	2	4	8	10
Железобетонные	$\frac{0,19}{0,18}$	$\frac{0,28}{0,26}$	$\frac{0,44}{0,42}$	$\frac{1,08}{0,97}$	$\frac{2,51}{2,49}$
Деревянные	$\frac{0,14}{0,12}$	$\frac{0,20}{0,19}$	$\frac{0,28}{0,27}$	$\frac{0,48}{0,50}$	$\frac{1,07}{1,09}$

На основе результатов моделирования можно прогнозировать накопление остаточных деформаций земляного полотна железной дороги и отклонение участка железнодорожного пути от номинальных параметров.

Библиографический список

1. Управление надежностью бесстыкового пути / В.С. Лысюк, В.Т. Семенов, и др.; под ред. В.С. Лысюка. – М.: Транспорт, 1999. – 373 с.

2. Троицкий М.Н., Дермелев В.Е. Экспериментальные исследования накопления деформаций в однородных средах и двухслойных системах при различном режиме приложений повторных нагрузок / В сб. «Обоснование расчетных параметров для нежестких дорожных покрытий». – М.: Дориздат, 1952. – С. 61–68.

3. Покровский Г.И. Исследования по физике грунтов. ОНТИ, 1937. – 42 с.

4. Пономарев В.П. Пучины на железных дорогах и методы борьбы с ними // Труды ЦНИИ МПС, вып. 50. – М.: Трансжелдориздат, 1952. – 261 с.

5. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности. Типография ГУП ВНИИЖТ, 2000. – 44 с.

6. Лысюк В.С., Поздняков Б.И., Тупов В.П. Методика расчета несущей способности основной площадки эксплуатируемого земляного полотна // Труды ЦНИИ МПС, вып. 451. – М.: Транспорт, 1971. – 110 с.

7. Влияние жесткости и неровностей пути на деформации, вибрации и силы взаимодействия его элементов/ под. ред. В.С. Лысюка // Труды ЦНИИ МПС, вып. 370. – М.: Транспорт, 1969. – 167 с.