

Динамическое воздействие тяжеловесных поездов на путь

На основе анализа и статистической обработки результатов, полученных в ходе динамических испытаний поездов массой 10 тыс. т на линии Датун — Циньхуандао, а также теоретических исследований их воздействия на путь, особенно в кривых и на уклонах большой длины, предложены меры по определению максимальной скорости движения таких поездов, по усилению путевой структуры, в том числе на мостах, в тоннелях и на водопропускных сооружениях, а также по выбору режимов вождения поездов.

Анализ результатов испытаний

Процедура и результаты испытаний

Общие сведения. Испытания поездов массой 10 тыс. т были проведены в Китае на линии Датун — Циньхуандао (рисунок) и на северном участке Датун — Тайюань линии Датун — Фынлинду (включая участок Аньтайпу — Дасинь специальной линии к угольной шах-



Один из участков линии Датун — Циньхуандао

те Пиншо) в период между 22 и 26 июля 2003 г. В ходе испытаний контролировали состояние верхнего строения пути, в том числе на мостах и в кривых. На девяти выбранных мостах (шести на линии Датун — Циньхуандао, одном на линии Датун — Тайюань и двух на линии Пиншо) измеряли и регистрировали три параметра: амплитуду поперечных колебаний, прогиб конструкции моста и продольное смещение верхних частей опор. В девяти выбранных местах (семи на линии Датун — Циньхуандао и двух на линии Датун — Тайюань) изучали динамическое воздействие поездов на путь в переходных и круговых кривых. При этом на линии Датун — Циньхуандао для испытаний использовали два опытных поезда, на линии Датун — Тайюань и на линии Пиншо — один поезд.

Результаты испытаний. Результаты анализа данных динамического воздействия поезда на мосты показали, что амплитуда поперечных колебаний превышала установленное предельное значение на пяти мостах (55,5% общего числа исследованных мостов), в

том числе на двух мостах на линии Датун — Циньхуандао (33,3% числа исследованных мостов на этой линии), на одном мосту на линии Датун — Тайюань (100%) и на двух мостах на линии Пиншо (100%). На двух мостах (22,2% общего числа исследованных мостов) зарегистрирован прогиб пролетных строений, превышавший регламентированное предельное значение, в том числе на одном мосту на линии Датун — Циньхуандао (14,3% числа исследованных мостов на этой линии) и на одном мосту на линии Датун — Тайюань (100%). Наблюдалось также смещение в различной степени (максимальное смещение составило 3 мм, минимальное — 0,5 мм) верхних частей опор мостов; указанные смещения самостранялись после прохода поезда за счет упругости конструктивных элементов.

Исследования динамики движения поездов в кривых показали, что на линии Датун — Циньхуандао имелся один участок с положительным вектором вариации (максимальное значение вариации 3 мм) в кривой, переходной к круговой кривой радиусом 600 м (14,3% числа исследованных кривых на этой линии), и три участка с положительным вектором вариации (максимальное значение вариации 2 мм) в круговых кривых (33,3% общего числа исследованных кривых), в том числе два участка на линии Датун — Циньхуандао (28,6% числа исследованных кривых на этой линии) в кривых радиусом 700 и 800 м соответственно и один участок на линии Датун — Тайюань (50% числа исследованных кривых на этой линии) в кривой радиусом 575 м.

Анализ результатов испытаний. Испытания показали, что воздействие динамических нагрузок на путь и искусственные сооружения, возникающих при проходе поезда массой 10 тыс. т, весьма значительно.

Все параметры этого воздействия на мосты в ряде случаев превышали установленные предельные значения по амплитудам поперечных вибраций, прогибу пролетных строений и смещению опор, что обусловлено, в частности, ослаблением связей с мостовым полотном. Кроме того, при этом появляется остаточная упругая деформация, и ее накопление может привести к повреждению несущих конструкций и проезжей части мостов, что требует серьезного изучения. Отсюда следует, что состоянию мостов необходимо уделять особое внимание.

Воздействие поезда на путь в кривых приводило к тому, что максимальные значения вариации положительного вектора достигали 2–3 мм. Здесь предельно допустимые значения также были превышены в отдельных случаях, но следует учесть, что это при проходе одного-двух поездов массой 10 тыс. т; проход же достаточно большого числа поездов массой 10 тыс. т (на линии Датун — Циньхуандао находятся в обращении примерно 26 таких поездов в сутки и в перспективе намечается постепенное увеличение этого показателя) обусловит, что все больше параметров будет выходить за пределы допустимого.

Выявлено, что в кривых (особенно радиусом менее 1500 м) верхнее строение пути значительно ослаблено. По мере накопления пропущенного тоннажа будут расти затраты труда на ремонт и содержание пути и снизится срок его службы. Это свидетельствует, с одной стороны, что путевая структура еще не приспособлена для пропуска поездов массой 10 тыс. т и поэтому следует предпринять меры для улучшения конструкции и повышения качества пути (включая рельсы, шпалы и балластную призму) и, с другой стороны, что практика технического обслуживания и ремонта пути не соответствует условиям пропуска таких поездов, так что

следует уделить внимание уменьшению интервалов между очередными операциями по пути, внедрению средств механизации путевых работ и совершенствованию применяемого оборудования.

Имеют место увеличивающиеся различия в конструкции и состоянии основания и верхнего строения пути на разных линиях. Данные проверки показывают, что качество пути на линиях Датун — Тайюань и Пиншо все еще не соответствует качеству пути на линии Датун — Циньхуандао (особенно в отношении мостов и кривых). Для обеспечения регулярного пропуска поездов массой 10 тыс. т необходимо усиление пути и искусственных сооружений, а также улучшение практики их ремонта и технического обслуживания.

Анализ наблюдений и статистических данных

Поскольку в 2003–2004 гг. на линии Датун — Циньхуандао был проведен капитальный ремонт пути с заменой рельсов, сравнение статистических данных затруднено, ввиду чего анализ был выполнен на основе статистических данных для участка между станциями Дасинь и Ханьцзялин в северной части линии Датун — Фынлинду.

Повреждения рельсов и изломы сварных швов в стыках оказались весьма серьезными. С января по май 2004 г. имели место 295 существенных повреждений рельсового пути, в то время как за аналогичный период 2003 г. — только 74; число незначительных повреждений, наоборот, снизилось с 45 до 27 случаев. Вместе с тем за эти же периоды число существенных повреждений крестовин стрелочных переводов снизилось с 51 до 21, а несущественных — с 23 до 8 случаев.

В значительной степени увеличилось число участков с параметрами, выходящими за допустимые пределы, на линиях II и III категории, что было установлено при

сравнении результатов измерений, выполненных с помощью бортовых приборов с января по август 2003 г. и с сентября 2003 по апрель 2004 г. За указанные два периода было зафиксировано соответственно 651 и 1176 случаев отклонения от установленных норм состояния пути на участках II категории. В самый неблагоприятный в этом отношении месяц дефекты пути были отмечены в 306 местах, причем максимальные отклонения наблюдались после прохода поездов массой 10 тыс. т. За эти же периоды на участках III категории случаев отклонения от установленных норм состояния пути зафиксировано соответственно 76 и 198; в самый неблагоприятный месяц в этом отношении дефекты пути были отмечены в 36 местах, и максимальные отклонения имели место тоже после прохождения поездов массой 10 тыс. т.

В процессе организации обращения поездов массой 10 тыс. т по мере увеличения числа таких поездов значительно возрастала повреждаемость рельсов, причем самую важную проблему представляли изломы сварных швов на стыках. Это значит, что требуется особое внимание к выявлению повреждений этого вида с помощью эффективных средств дефектоскопии и своевременному проведению ремонта или замены поврежденных рельсов в целях обеспечения безопасности движения. Кроме того, увеличение числа случаев нарушения геометрии пути на участках II и III категории свидетельствует, что интенсификация движения поездов массой 10 тыс. т ускоряет появление повреждений и такого рода, вынуждая сокращать интервалы между очередными путевыми работами. Это также обуславливает необходимость гарантированного проведения планового обслуживания путей через установленное время с соблюдением должного его качества, а также корректировочного ремонта.

Анализ воздействия поездов массой 10 тыс. т на рельсовый путь

Определение скорости движения поездов

Повреждение пути под воздействием прохождения поездов массой 10 тыс. т непосредственно связано с кинетической энергией поезда, выражаемой формулой $W \sim mv^2$, где W — воздействие кинетической энергии поезда на путь, m — масса поезда, v — скорость его движения. На этой основе можно сравнить и проанализировать техническую скорость обычного маршрутного поезда массой 6400 т и поезда массой 10 тыс. т при условии равенства их кинетических энергий.

Линия Датун — Циньхуандао первоначально была рассчитана на пропуск по ней маршрутных поездов: груженых со скоростью до 80 км/ч и порожних со скоростью 70 км/ч. Опыт эксплуатации данной линии в течение многих лет доказал возможность обеспечения в этих условиях надежной и безопасной работы. Однако с началом обращения на данной линии в сентябре 2003 г. в порядке эксперимента поездов массой 10 тыс. т наблюдалось ускоренное изменение состояния верхнего строения пути с очевидными повреждениями, снижением качества и прочности. Основные причины этого связаны с высокой скоростью движения поездов массой 10 тыс. т (до 80 км/ч) и большим значением их кинетической энергии, а также изменением упругой деформации пути на пластичную. Для выбора научно обоснованной и оптимальной технической скорости движения поезда массой 10 тыс. т были проведены представленные ниже вычисления.

Расчетная формула для кинетической энергии поезда массой 6400 т имеет вид:

$$P_{6400} = 1/2 m_{6400} v_{6400}^2,$$

где m_{6400} — масса поезда (6400 т); v_{6400} — скорость поезда (80 км/ч).

Примем $P_{6400} = P_{10000}$ и найдем v_{10000} из следующего выражения:

$$P_{6400} = P_{10000}, \text{ или } 1/2 m_{6400} v_{6400}^2 = 1/2 m_{10000} v_{10000}^2,$$

где m_{10000} и m_{6400} — масса поездов (10 тыс. и 6400 т); v_{6400} и v_{10000} — скорость поездов (80 и 64 км/ч) соответственно.

Таким образом, максимальная скорость движения поезда массой 10 тыс. т не должна превышать 64 км/ч по условиям необходимости обеспечения такого же уровня безопасности, который имеет место при пропуске маршрутного поезда массой 6400 т. Аналогично для поезда массой 20 тыс. т максимальная скорость не должна превышать 50 км/ч.

Воздействие поездов на путь в криволинейных участках

При движении поезда в кривых поперечные горизонтальные силы, действующие на путь, выше, чем при движении по прямой. Поперечное горизонтальное усилие создается за счет трех источников: направляющей силы (Q_{nc}), которая зависит от радиуса кривой, типа локомотивов и вагонов, конструкции пути и скорости движения поезда; неуравновешенной центробежной силы (Q_{cc}), зависящей от скорости движения поезда, радиуса кривой, массы поезда и возвышения наружного рельса; поперечной составляющей (Q_{rc}), создаваемой продольной силой на криволинейном участке пути и зависящей от общей массы и длины груженого поезда, условий работы тормозов и радиуса кривой.

С точки зрения обеспечения безопасности движения поездов на железных дорогах Китая в качестве главного критерия принят коэффициент схода с рельсов (т. е. отно-

шение Q/P горизонтальной силы к вертикальной в одной и той же точке), который не должен превышать 0,8 (ввиду ограничения значения поперечной горизонтальной силы). Вертикальная сила при проходе поезда массой 10 тыс. т обычно составляет половину осевой нагрузки (11 т для вагона модели С63 и 12,5 т для вагона модели С76), а поперечная горизонтальная сила должна определяться с учетом сочетания действия нескольких факторов (т. е. $Q = Q_{nc} + Q_{cc} + Q_{rc}$).

В 1985 г. Научно-исследовательский институт строительства железных дорог Академии железнодорожных наук Китая (CARS) и департамент путевого хозяйства управления Пекинской региональной железной дороги организовали проведение исследований динамических характеристик пути при движении маршрутных поездов на линии Пекин — Баотоу. Экспериментальный поезд, использованный в ходе исследования, состоял из 90 вагонов модели С62А; скорость движения поезда составляла 60 км/ч, а радиус кривой на участке пути, где проводились испытания, — 600 м. Результаты испытаний показали, что значение поперечной горизонтальной силы, воздействующей на путь, превышало 36 кН. При увеличении скорости движения поезда эта сила также возрастала.

Однако все массовые и скоростные параметры поезда массой 10 тыс. т, использованные в ходе рассматриваемых испытаний, значительно превышают аналогичные параметры поезда, использованного в ходе испытаний 1985 г., поэтому зафиксированные значения поперечной горизонтальной силы оказались намного большими, чем 36 кН.

При торможении на криволинейных участках пути отмечалось резкое увеличение воздействия поперечной горизонтальной силы на путь, что естественно для длин-

носоставных тяжеловесных поездов. Результаты испытаний, проведенных в 1985 г. на линии Пекин — Баотоу, показали, что при торможении поезда в кривой значение поперечного горизонтального усилия почти удваивается (т. е. $Q = Q_{\text{ис}} + Q_{\text{цс}} + Q_{\text{тс}} > 72 \text{ кН}$). Между тем при торможении поезда в течение короткого промежутка времени имеет место уменьшение вертикальной силы, воздействующей на часть пути, расположенную под серединой и хвостом поезда, что способствует увеличению отношения Q/P и тем самым ухудшает безопасность движения.

Полученные в ходе испытаний значения соотношения горизонтальной и вертикальной сил Q/P для поезда массой 10 тыс. т, движущегося по криволинейным участкам пути, составляли 0,58–0,65. Такой результат удовлетворяет установленному предельному значению этого параметра, равному 0,8. Вместе с тем постоянное накопление поперечной деформации за счет увеличения повторяющегося воздействия на путь поперечной горизонтальной силы может привести к нарушению поперечной устойчивости пути, возникновению проблем, связанных с поддержанием требуемых направляющих свойств рельсовой колеи, повреждениям железобетонных шпал, уширению колеи и интенсивному боковому износу рельсов. В ряде стран, например в США и Японии, на основе аналогичных испытаний было установлено, что предельное значение горизонтальной силы не должно превышать 0,4 от значения вертикальной силы. С учетом этого можно сказать, что горизонтальная сила от воздействия поезда массой 10 тыс. т на путь будет превышать предельное допустимое значение при движении поезда в кривых радиусом менее 600 м со скоростью 60 км/ч и радиусом менее 800 м при скорости 80 км/ч.

Воздействие поездов на путь на протяженных спусках

При движении поезда на протяженном спуске предпринимаются меры по его торможению за счет применения пневматических тормозов на вагонах и реостатных тормозов на локомотивах. Путь должен обладать достаточными прочностными характеристиками и иметь возможность воспринимать воздействие значительных продольных тормозных усилий. В общем случае тормозная сила должна быть приложена ко всему поезду, а воздействующее на путь тормозное усилие — распределяться по всей длине пути под поездом; при этом через определенное время могут появиться такие повреждения пути, как угон рельсов и наклон шпал. Однако если во время движения поезда на спуске используется только реостатное торможение, имеет место воздействие всего тормозного усилия только на часть пути, находящуюся под локомотивом, и такая интенсивная нагрузка может привести к более быстрому возникновению указанных повреждений пути.

На двух участках с протяженными уклонами железнодорожных линий Датун — Циньхуандао (321–323 км, крутизна 12‰) и Пиншо (16–18 км, крутизна 17‰) были проведены исследования изменений состояния пути, появившихся с начала обращения поездов массой 10 тыс. т, которые позволили получить следующие результаты.

Наблюдалось появление волнообразного подъема и проседания пути, а также незначительного наклона шпал. Хотя полученные в результате измерений отклонения в значениях параметров пути не превышали предельно допустимых, принятых в нормах по содержанию пути, вибрационное воздействие поезда на путь еще больше возрастает при проходе по участку с такими нарушениями, как усадка бал-

ластной призмы, ослабление рельсовых скреплений и выход наружу резиновых шпальных накладок, что приводит к осложнениям при организации технического обслуживания и ремонта пути. Если не принять мер по исправлению этой ситуации, может возникнуть угроза безопасности движения.

Были зарегистрированы такие дефекты рельсов, как волнообразный износ и неравномерный износ боковой поверхности.

Ухудшилась направляющая способность пути и вынужденно сократились интервалы между очередными путевыми работами.

Рекомендации

Предложения по скорости движения поездов

Максимальная скорость движения поездов массой 10 тыс. т не должна превышать 65 км/ч, а в кривых радиусом 800 м и менее следует снижать эту скорость до 50–55 км/ч. Поскольку другие условия изменению не подлежат, именно снижение скорости движения поездов может оказать непосредственное влияние на улучшение состояния путевой структуры. В некоторых странах максимальная скорость движения длинносоставных тяжеловесных поездов ограничена 60–65 км/ч.

Предложения по улучшению состояния пути

Конструкция пути на всем протяжении железнодорожного коридора, рассчитанного на пропуск поездов массой 10 тыс. т, должна быть усилена. В частности, должны быть использованы рельсы тяжелого типа погонной массой 60 кг/м и более; необходимо также применять стрелочные переводы соответствующего типа; в путь должны быть уложены шпалы модели III или новые шпалы модели II; следует использовать

только высококачественный балласт и увеличить ширину верхней части балластной призмы; необходимо обеспечить требуемую конфигурацию кривых радиусом 800 м и менее с поддержанием ее с помощью тяг и противоугонов; на участках пути с протяженными уклонами для увеличения стабильности пути в продольном направлении должны быть уложены шпалы, соответствующие на одну ступень более высокому стандарту, чем на других участках; бровку балластной призмы необходимо утрамбовать вибрационным методом, а крутизна ее откосов должна обеспечивать повышенную стабильность пути в поперечном направлении.

Предложения по режимам движения и тяги поездов

При движении поезда массой 10 тыс. т в кривых и на протяженных спусках динамическое воздействие на путь в значительной степени зависит от уровня квалификации машиниста и, соответственно, плавности хода поезда. В связи с этим необходимо организовать обучение машинистов и поездных бригад методам вождения поезда на наиболее сложных участках пути и обмен опытом такого вождения. В кривых следует по возможности избегать применения электрического торможения. При движении поездов по участкам с протяженными спусками следует в основном применять пневматические тормоза состава, а электрический тормоз локомотивов — в качестве вспомогательного. Воздействие кинетической энергии поезда на рельсовый путь должно распределяться равномерно, что уменьшает сосредоточенную нагрузку на путь со стороны локомотива. Необходимо предпринять меры по оснащению эксплуатируемого подвижного состава современными техническими средствами, в частности электрон-

ной системой управления пневматическими тормозами с обеспечением синхронного торможения всего поезда.

Предложения по контролю параметров пути

На основе анализа поезда ситуации и последующей оптимизации графика движения можно сказать, что доля поездов массой 10 тыс. т будет неуклонно возрастать, что неизбежно будет способствовать интенсификации их воздействия на путь и, соответственно, росту повреждаемости пути. Таким образом, с одной стороны, необходимо постоянно предпринимать меры по обеспечению периодического динамического контроля за состоянием путевой структуры на разных участках линий, особенно на важнейших железнодорожных мостах, в криволинейных участках пути и участках с протяженными уклонами; получаемые данные должны аккумулироваться и подвергаться серьезному анализу и изучению. С другой стороны, к выполнению такого контроля и анализу его результатов следует привлечь ученых и специалистов, что позволит дать научно обоснованные рекомендации по работе с поездами массой 10 тыс. т с целью обеспечения безопасности движения.

Предложения по усилению путевой структуры

Мосты, тоннели, водопропускные сооружения и земляное полотно образуют основание рельсового пути, и от их состояния в значительной степени зависит безопасность и точность соблюдения графика движения поездов. В связи с этим следует улучшить организацию работ по ремонту и содержанию мостов, тоннелей, водопропускных сооружений и земляного

полотна. Главное внимание необходимо уделить по возможности быстрой организации проверки состояния искусственных сооружений большой длины, мостов особого значения или специфической конструкции, а также мостов с дефектами, которая должна осуществляться специализированными бригадами. Необходимо также организовать своевременное устранение дефектов. Техническое обслуживание и ремонт искусственных сооружений должны быть улучшены за счет оптимальной дислокации машин и оборудования.

Заключение

Результаты рассмотренных испытаний, а также других исследований, выполненных позднее, позволили железным дорогам Китая добиться положительных результатов в области тяжеловесного движения, прежде всего на линии Датун — Циньхуандао. Здесь благодаря усилению инфраструктуры, внедрению более мощных локомотивов и вагонов увеличенной грузоподъемности стало возможным ввести в регулярное обращение поезда массой 10 тыс., а затем и 20 тыс. т, что позволило в 2007 г. перевести по этой двухпутной электрифицированной линии длиной 653 км 300 млн. т угля.

Эти достижения получили всеобщее признание. Железные дороги Китая стали, в частности, полноправным членом Международной ассоциации тяжеловесного движения (ИНА). Еще одним подтверждением интереса специалистов железнодорожников всего мира к китайскому опыту стало решение руководства ИНА провести очередную 9-ю конференцию именно в Китае, где она должна состояться в июне 2009 г.

Материалы ИНА; Zh. Hongyan. Chinese Railways, 2005, № 1, p. 38–42.