

КРИТЕРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСКАЕМОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ В КРИВЫХ

Проаналізовані наявні критерії визначення допустимої швидкості руху в кривих, вказані напрямки розвитку при розгляданні швидкісного руху.

Проанализированы существующие критерии определения допускаемой скорости движения в кривых, указаны направления развития при рассмотрении скоростного движения.

The existing criteria of admitted speed definition of movement in curves are analysed, directions of development are specified by consideration of high-speed movement.

Для определения допускаемой скорости движения в кривых на железных дорогах Украины в настоящее время руководствуются инструкцией ЦП-0056 [1]. В качестве основных критериев используются три: непогашенное ускорение – $\alpha_{\text{нп}}$, м/с^2 , скорость изменения непогашенного ускорения – Ψ , м/с^3 и скорость подъема колеса по отводу возвышения наружного рельса – f , мм/с .

Определению максимально допустимых значений перечисленных критериев посвящено большое количество исследований. Для пассажирских поездов согласно [1] принято максимальное непогашенное ускорение $0,7 \text{ м/с}^2$ при движении по одиночным кривым и $0,4 \text{ м/с}^2$ для сопряженных кривых без переходной кривой; скорость нарастания непогашенного ускорения – $0,6 \text{ м/с}^3$, а для многорадиусных кривых, направленных в одну сторону, и для сопряженных кривых без переходной кривой – $0,3 \text{ м/с}^3$; допустимая скорость подъема колеса по отводу возвышения $28\text{--}35 \text{ мм/с}$.

История выбора и виды критериев для оценки плавности и комфортабельности пассажиров при движении в кривой подробно описана в работе проф. Ершкова О. П. [2]. Там же дан широкий обзор критериев, используемых в ряде других стран.

Опыт эксплуатации показал, что выше приведенные критерии являются не только характеристиками плавности хода и условий комфортабельности езды пассажиров, но и в существенной степени отражают уровень динамического воздействия на путь. Предложен и ряд других критериев, которые применяются при выполнении различных расчетов, однако не являются определяющими. Так, для оценки внезапного изменения поперечных ускорений Δ определяют относительное изменение непогашенного ускорения в рассматриваемом сечении и потерю кинетической энергии при ударе

набегающего колеса в наружный рельс [3]. Может оцениваться полное поперечное горизонтальное ускорение, которое согласно [4] не должно превышать значение $1,7 \text{ м/с}^2$.

Проф. Г. М. Шахунянц в работе [5] для оценки комфортности езды пассажира предлагает использовать полное ускорение, действующее на пассажира $\alpha_{\text{полн}}$, которое складывается из поперечного, возникающего при движении по окружности, вертикального – при движении по кривым в вертикальной плоскости и по переломам продольного профиля и продольного ускорения, связанного с процессами торможения и разгона

$$\alpha_{\text{полн}} = \sqrt{\alpha_{\text{поп}}^2 + \alpha_{\text{верт}}^2 + \alpha_{\text{прод}}^2}. \quad (1)$$

В работе [6] отмечается, что при определении допускаемой скорости движения в кривых нужно также учитывать импульсные ускорения, величина которых должна быть менее $2\text{--}2,5 \text{ м/с}^2$. Также отмечается, что на пассажира действуют суммарные ускорения, которые для оценки предлагается разделить на отдельные составляющие. При этом предлагаются следующие нормативные значения – для продольных ускорений $0,9\text{--}1,0 \text{ м/с}^2$; для вертикальных – $0,5 \text{ м/с}^2$, для поперечных горизонтальных – $0,7\text{--}1,0 \text{ м/с}^2$.

В. С. Шаройко, занимаясь вопросами оценки комфортабельности езды пассажиров [7; 8] пришел к выводу, что «при кратковременном воздействии (до 3 с) допускаемое ускорение может быть равно $2,0 \text{ м/с}^2$. При значительных интервалах (низкой частоте) кратковременное воздействие таких ускорений не вызывает (по объективным и субъективным данным) неприятных ощущений у пассажиров и обеспечивает комфортабельные условия езды».

А. Н. Трофимов в [9] отмечает, что по обработке экспериментальных данных средние ус-

корения в кузове пассажирского вагона для вертикальных и горизонтальных колебаний соответственно достигают 1,58 и 0,93 м/с², а максимально вероятные – 3,91 и 1,99 м/с².

Основной критерий, используемый в расчетах, – значение непогашенного ускорения – хотя и характеризует процесс движения, но не учитывает динамических процессов и, таким образом, является статическим. Проиллюстрируем это на конкретном примере. На рис. 1. показана кривая (график стрел и возвышений наружного рельса). Стрелы измерялись от середины хорды длиной 20 м с шагом 10 м. На этой кривой в мае 2003 г. были проведены экспериментальные поездки сцепы, включающего пассажирский вагон, оборудованный для проведения измерений. На рис. 2 (в соответствии с горизонтальным масштабом рис. 1) показаны графики горизонтальных ускорений для скоростей движения 110 и 160 км/ч, измеренные на

шкворне передней по ходу движения тележки пассажирского вагона и рассчитанные по общеизвестной формуле

$$\alpha_{\text{нп}} = \frac{V^2}{3,6^2 R} - \frac{g}{S} h \quad (2)$$

для точек, в которых измерялись стрелы и возвышения.

При сопоставлении экспериментальных и теоретических результатов можно сделать следующие выводы:

- горизонтальные ускорения при движении в кривой носят колебательный характер с пиковыми значениями, имеющими значительную амплитуду;
- амплитуда колебаний и разница между динамическими (измеренными экспериментально) и статическими ускорениями возрастает с увеличением скорости движения.

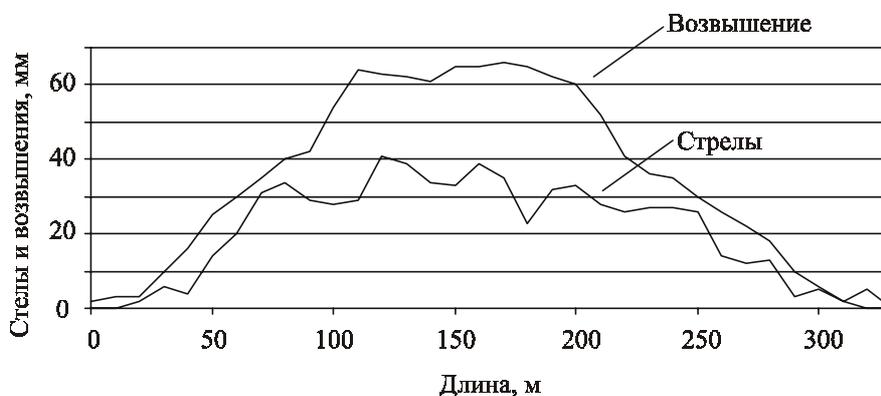


Рис. 1. Геометрические параметры экспериментальной кривой

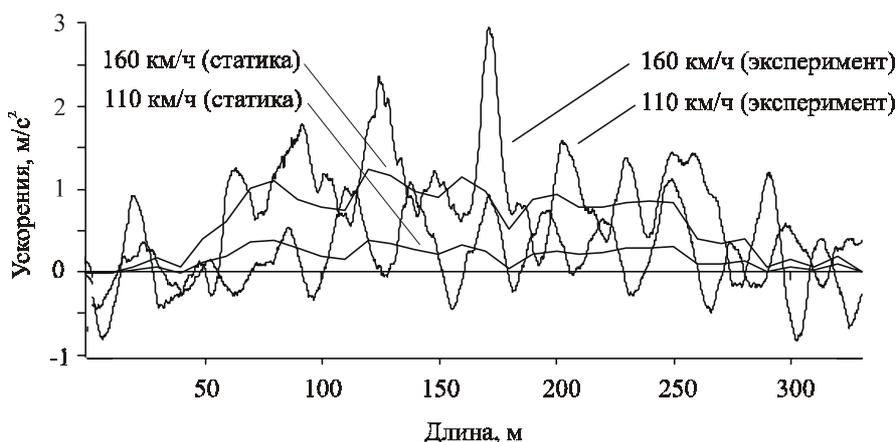


Рис. 2. Графики горизонтальных ускорений

Колебательный характер ускорений, действующих на пассажиров, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, оказывает существенное влияние на комфортабельность езды, утомляемость и самочувствие людей.

Особенно это важно для высоких скоростей движения, для которых амплитуда колебаний увеличивается.

Существенную сложность в решении данного вопроса составляет нормирование парамет-

ров колебательного процесса. Основным критерием в установлении таких норм на участках скоростного движения должна служить комфортабельность езды пассажиров. На сегодняшний день в Украине нет официальных нормативов такого характера, рассчитанных на практическое применение.

Исследования этого вопроса проводятся давно, но носят в основном теоретический характер. Еще в 1940-х гг. Э. Шперлинг на основании проводимых им опытов дал ряд рекомендаций. Коэффициент плавности хода W по методу Э. Шперлинга [10] определяется по формуле

$$W = 2,7k^{10}\sqrt{T_{\max}E_{\max}}, \quad (3)$$

где k – коэффициент, зависящий от направления и частоты колебаний;

T_{\max} – интенсивность нарастания ускорений,

$$T_{\max} = \frac{d\alpha}{dt}, \quad (4)$$

где α – амплитуда ускорения;

E_{\max} – наибольшая кинетическая энергия, которую приобретает при колебаниях единичная масса пассажира,

$$E_{\max} = y \cdot \alpha, \quad (5)$$

где y – амплитуда перемещения, т. е.

$$y = \iint \alpha dt dt. \quad (6)$$

Для гармонических колебаний

$$y = \frac{\alpha}{(2\pi f)^2}, \quad (7)$$

где f – линейная частота, Гц.

Подставляя выражения (4–7) в формулу (3) после преобразований получим

$$W = 0,9k^{10}\sqrt{\frac{\alpha^3}{f}} \quad (8)$$

или

$$\alpha = \left(\frac{W}{0,9k}\right)^{\frac{10}{3}}\sqrt[3]{f}. \quad (9)$$

Показатель плавности хода (или показатель комфорта) не имеет точного нормированного значения. Он определяет оценку качества езды и время усталости пассажира. Если принять $W = 3,25$ [9] и $f = 1,4$ Гц, $k(f = 1,4) = 1,1$, то

по формуле (9) получим $\alpha = 0,6$ м/с², при $W = 3,5$ [10] – $\alpha = 0,75$ м/с².

Значит, для $W = 3,25$ допускается амплитуда ускорений (т. е. величина их пиковых значений) только 0,6 м/с². Но это справедливо при постоянно действующем ускорении на протяжении 4,2 часов – время усталости пассажира при $W = 3,25$ согласно [10]. При средней скорости движения 60 км/ч за это время поезд пройдет 250 км, т. е. здесь не может идти речь об оценке движения для отдельно взятой кривой.

Также существует методика по определению комфортабельности езды пассажиров, рекомендованная к использованию ОСЖД и принятая на заседании комитета подвижного состава ОСЖД в Париже в 1994 г., – Памятка 513 «Руководящие принципы для оценки комфортности пассажира от вибрации в железнодорожных средствах передвижения» [11]. Учитывая различные цели и задачи исследования, применяются упрощенный и полный методы оценки комфортабельности езды [11]. При упрощенном методе комфорт пассажира определяется приблизительно от ускорений, действующих на уровне пола вагона. Полный метод учитывает ускорения, действующие в уровне пола, сидения и спины (спинки сидения) на сидящего человека. Учитываются ускорения, действующие во всех трех направлениях – горизонтальное, вертикальное и продольное. Для каждого направления учитываются весовые коэффициенты, зависящие от частоты колебаний. Результатом статистической обработки являются ускорения с вероятностью 50 % и 95 %: a_{50} и a_{95} .

Для расчета коэффициента пассажирского комфорта приводятся две формулы – упрощенная

$$N = 4a_{ZP95} + 2\sqrt{a_{YA95}^2 + a_{ZA95}^2} + 4a_{XD95} \quad (10)$$

и расширенная

$$N = 3\sqrt{16a_{XP50}^2 + 4a_{YP50}^2 + a_{ZP50}^2} + 5a_{YP95}, \quad (11)$$

где a – амплитуда ускорения с учетом весового коэффициента, учитывающего частоту колебаний:

1-й индекс указывает направление ускорения;

2-й индекс – место действия ускорения: P – пол, D – уровень сидения, A – уровень спинки сидения;

3-й индекс – вероятность значения ускорения по данным статистической обработки.

Коэффициент комфорта пассажира оценивается по шкале, приведенной в табл. 1.

Таблица 1
Оценка комфортности пассажира по коэффициенту N

Значение коэффициента N	Характеристика комфорта пассажира
$N < 1$	очень хороший
$1 < N < 2$	хороший комфорт
$2 < N < 4$	умеренный комфорт
$4 < N < 5$	бедный комфорт
$N > 5$	очень бедный комфорт

В зависимости от категории поезда рекомендуются следующие значения: пригородный поезд $N = 4$; обычный подвижной состав $N = 3$; подвижной состав люкс $N = 2$.

Как следует из формул (10) и (11) значения ускорений должны быть относительно небольшими. Например, если принять $N = 3$, вертикальные a_z и продольные ускорения a_x равными нулю, то из формулы (11) $a_{y95} = 0,6 \text{ м/с}^2$.

По данным проф. Г. М. Шахунянца [5] при движении исправного подвижного состава по исправному пути на прямом участке вагон испытывает продольные ускорения от $-0,25$ до $+0,25 \text{ м/с}^2$ и вертикальные ускорения от $0,25$ до $0,7 \text{ м/с}^2$. Исходя из этих значений примем $a_{x50} = 0,12 \text{ м/с}^2$, $a_{z50} = 0,48 \text{ м/с}^2$. Если на основании примеров расчетов, изложенных в [11] допустить, что $a_{y50} = 0,5\dots$, то при весовых коэффициентах, учитывающих частоты колебаний, равных $1,0$ для $N = 3$ получим $a_{y95} = 0,18 \text{ м/с}^2$.

Исходя из [5] горизонтальные ускорения, действующие на прямом участке, колеблются от $-0,25$ до $+0,25 \text{ м/с}^2$. Значит данные ускорений, приводимые в [5] для движения экипажа по прямому участку, укладываются (впритык) в интервал, получаемый по методике оценки

комфортности пассажира, изложенной в Памятке 513. Таким образом, методика оценки комфортности пассажира [11] и методика оценки плавности хода [10] в рассмотренном варианте применимы только для характеристики движения экипажа по прямому участку пути.

Еще одним фактором, который необходимо учитывать при оценке движения в кривой является направление ускорений. Пассажир ощущает действие различных ускорений в виде их геометрической суммы – полного ускорения, и в том направлении, которое определяется значениями его составляющих. На основании ускорений, измеренных в различных плоскостях во время экспериментов, указанных выше, были определены значения и направления действия полного ускорения. На рис. 3 и 4 показаны направления действия полного ускорения на уровне нижней полки над шкворнем первой по ходу движения тележки пассажирского вагона для скоростей 160 и 110 км/ч соответственно. Горизонтальные отметки длин на рисунках соответствуют геометрии кривой, показанной на рис. 1. Для сопоставления характера движения с прямым участком, показаны данные на 100 м до, и после кривой. Направление действия ускорения определялось в радианах угла в плоскости, перпендикулярной продольной оси вагона. В качестве нулевого значения принято горизонтальное направление наружу кривой.

Тогда при значениях угла $\alpha \in \left(-\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{4}\right)$ можно считать, что преобладают горизонтальные ускорения, действующие наружу кривой; при $\alpha \in \left(\frac{3\pi}{4}; \frac{5\pi}{4}\right)$ – горизонтальные ускорения, действующие вовнутрь кривой; при $\alpha \in \left(\frac{\pi}{4}; \frac{3\pi}{4}\right)$ и $\alpha \in \left(-\frac{\pi}{4}; -\frac{3\pi}{4}\right)$ – преобладают вертикальные ускорения, направленные соответственно вверх и вниз.

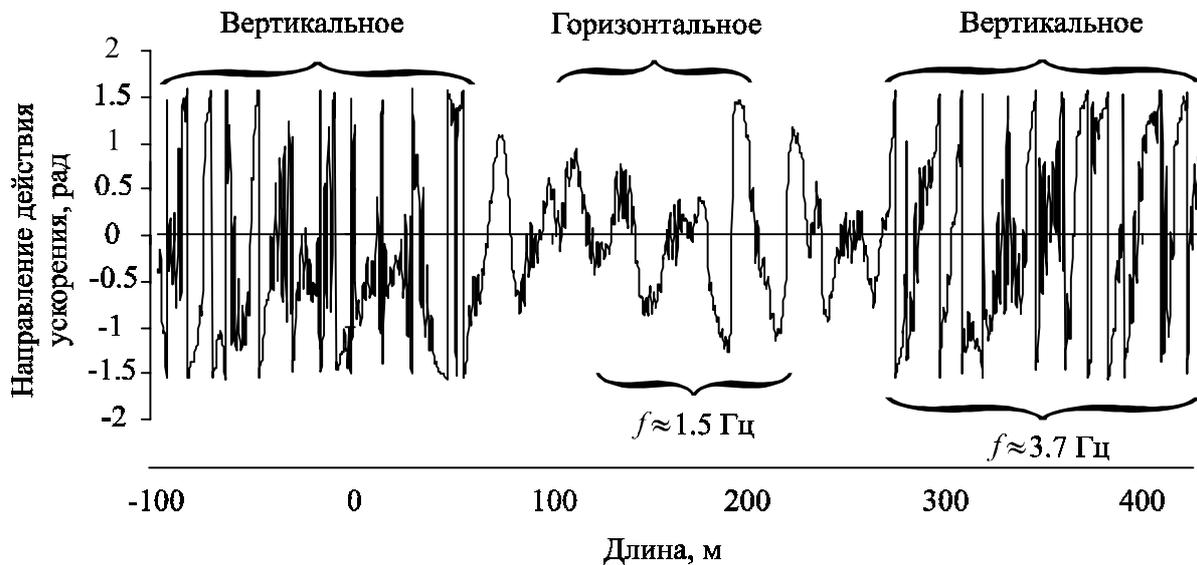


Рис. 3. Направление действия полного ускорения при движении в кривой со скоростью 160 км/ч

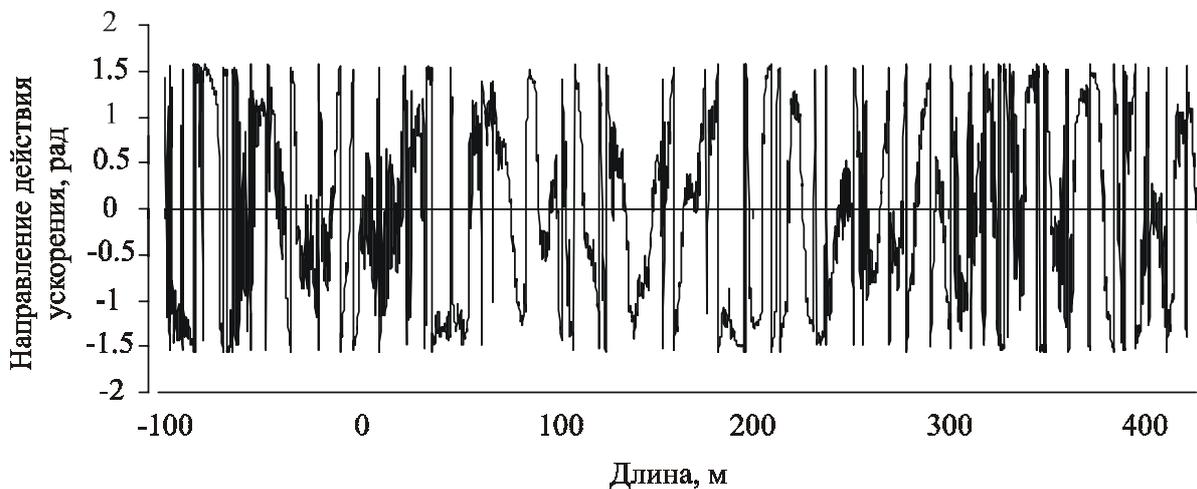


Рис. 4. Направление действия полного ускорения при движении в кривой со скоростью 110 км/ч

Как видно из рис. 3 при движении по прямому участку пути преобладали вертикальные ускорения с чередованием направления действия вверх-вниз и имеющие примерно постоянную частоту колебаний 3,7 Гц. При движении по кривой (точнее по той ее части, где непогашенное ускорение имеет существенное значение) характер действия полного ускорения изменялся. Преобладающим становилось горизонтальное, направленное наружу кривой и частота колебаний уменьшалась более чем 2 раза по сравнению с прямым участком пути (составляла примерно 1,5 Гц). Следует отметить, что при движении с более низкими скоростями, например, 110 км/ч, при которых уровень непогашенного ускорения меньше, не наблюдалось столь выразительного изменения характера действия полного ускорения (см. рис. 4). Значит, при движении по рассмот-

ренной кривой со скоростью 160 км/ч и выше пассажир будет ощущать дискомфорт как минимум оттого, что «монотонное покачивание» прервалось отходом в сторону.

Таким образом, для правильного установления допустимых скоростей движения в кривых участках пути и норм на их содержание, особенно для высоких скоростей движения, необходимо применение методик и критериев позволяющих учитывать вышеизложенные особенности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей руху поїздів в кривих ділянках колії. ЦП-0056. – Д., 1999. – 44 с.
2. Сопряжения кривых и особенности движения подвижного состава по ним / Под ред. О. П. Ершко-

ва. Труды ЦНИИ МПС. Вып. 500. – М.: Транспорт, 1973. – 96 с.

3. Волошко Ю. Д., Юнкевич В. Г. Оптимизация динамических эффектов в пределах переходных кривых. ИВППС. – Д., 1980. – С. 101–117.

4. Ершков О. П., Львов А. А., Карцев В. Я. О допустимых значениях непогашенных ускорений и их приращений во времени на участках высокоскоростного движения. Железные дороги мира, 1977. – № 7. – С. 3–10.

5. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.

6. Высокоскоростное пассажирское движение (на железных дорогах) / Под ред. Н. В. Колодяжного. – М.: Транспорт, 1976. – 416 с.

7. Шаройко В. С., Курашвили А. Е., Киселев А. С. К вопросу о комфортабельности езды пассажиров в скорых поездах. Исследование работы

стрелочных переводов под подвижной нагрузкой. – Л., 1968. – С. 74–81.

8. Шаройко В. С., Киселев А. С. О допускаемых значениях горизонтальных ускорений при кратковременном их воздействии. Труды ЛИИЖТа, 1971. Вып 323. – С. 28–39.

9. Трофимов А. Н. Неровность в жесткой крестовине и комфортабельность езды. Исследование взаимодействия пути и подвижного состава. Д., 1980. – С. 80–88.

10. Вершинский С. В., Данилов В. Н., Челпков И. И. Динамика вагона. – М.: Транспорт, 1972. – 304 с.

11. Leaflet 513. Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles. Traction and Rilling Stock Committee. – Paris, 1994.