

Олійник М.О., канд. техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ РАДІУСА УГНУТИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ КРИВИХ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ДІЇ ВІДЦЕНТРОВОГО ПРИСКОРЕННЯ

Анотація. У роботі наведено метод проектування червоної лінії поздовжнього профілю автомобільних доріг кривими змінного радіуса із розробкою алгоритмів визначення проектних відміток. Досліджена визначення радіуса угнутої вертикальної кривої в залежності від дії відцентрового прискорення при проектуванні червоної лінії поздовжнього профілю автомобільних доріг.

Ключові слова: профіль, радіус, прискорення.

Аннотация. В работе приведен метод проектирования красной линии продольного профиля автомобильных дорог кривыми переменного радиуса с разработкой алгоритмов определения проектных отметок. Исследовано определение радиуса вогнутой вертикальной кривой в зависимости от действия величины центробежного ускорения при проектировании красной линии продольного профиля автомобильных дорог.

Ключевые слова: профиль, радиус, ускорение.

Annotation. The thesis covers the method of designing of the red line of longitudinal profile of roads on the basis of changing-radius curves with elaboration of algorithm of definition marks determination. We also investigated the change of the radius of the concave vertical curve depending on its centrifugal speedup, during designing of the red line of longitudinal profile of roads.

Keywords: profile, radius, acceleration.

При русі по угнутому перелому, що не має пом'якшуючої кривої, автомобіль отримує поштовх тим більший, чим більший перелом. Щоб уникнути цього поштовху, в угнутий перелом вписується крива. Оскільки в угнутому переломі видимість забезпечена, то розрахунок цієї кривої необхідно виконувати тільки виходячи з умови пом'якшення поштовху.

Необхідно зазначити, що при малих радіусах угнутих кривих при русі вночі світло фар автомобіля освітлює проїзну частину на близькій відстані і видимість на такій кривій значно менше, ніж на прямій. Тому, чим більше інтенсивність руху на проектуємій дорозі вночі і чим більша розрахункова швидкість, тим більшими мають бути радіуси вертикальних кривих.

При русі по вертикальній угнутій кривій, на автомобіль діє відцентрова сила, прискорення якої необхідно обмежити, щоб уникнути несприятливого впливу на психофізичний стан водія та пасажирів, обмежити перевантаження ресор і поштовхів при в'їзді на криву. Якщо допустиме прискорення a_0 , то:

$$a_0 = \frac{v^2}{R}, \quad R = \frac{v^2}{a_0}, \quad (1)$$

де a_0 – відцентрове прискорення, м/с²;

v – швидкість автомобіля, м/с;

R – радіус угнутої вертикальної кривої, м.

Таким чином,

$$R_{min} = \frac{v^2}{0,5} = 2 \times v^2, \quad (2)$$

де R_{min} – мінімальний радіус угнутої вертикальної кривої, м.

Таблиця 1 – Залежність радіусів угнутих вертикальних кривих від розрахункової швидкості (ДБН В.2.3 – 4:2007)

Найменування елементів	Розрахункові швидкості, км/год.									
	150	140	120	110	100	90	80	60	50	30
Найменший радіус угнутої кривої у поздовжньому профілі, м;										
	8000	7000	5000	4000	3000	2500	2000	1500	1200	600

Радіус вертикальної кривої при угнутому переломі профілю визначають за умови, щоб додаткове навантаження на ресори, викликане відцентровою силою, не перевищувало частки p від власної ваги автомобіля:

$$\frac{mv^2}{R} \leq pgt, \quad (3)$$

де m – маса автомобіля, кг;

$pg = a$ – відцентрове прискорення, м/с².

$$\text{Звідси: } \frac{v^2}{R} \leq pg, \quad R \geq \frac{v^2}{a}. \quad (4)$$

Через те, що відцентрове прискорення направлене вертикально вниз і не впливає на перекидання та ковзання автомобіля вниз, несприятливо впливає на психофізичний стан водія та пасажирів. Враховуючи дію відцентрове прискорення на водіїв та пасажирів, можна приймати $a = 1 \text{ м/с}^2$, що дає можливість значно зменшити радіус угнутої вертикальної кривої.

Таблиця 2 – Розрахунок мінімальних радіусів угнутих вертикальних кривих при умові, що відцентрове прискорення $a = 0,5 \text{ м/сек}^2$ та $a = 1 \text{ м/сек}^2$

$R \geq \frac{v^2}{a}$	V=150	V=140	V=120	V=110	V=100	V=90	V=80	V=60	V=50	V=30
$a = 0,5$	3472	3025	2222	1867	1543	1250	988	556	386	139
$a = 1,0$	1736	1512	1111	934	772	625	494	278	193	69

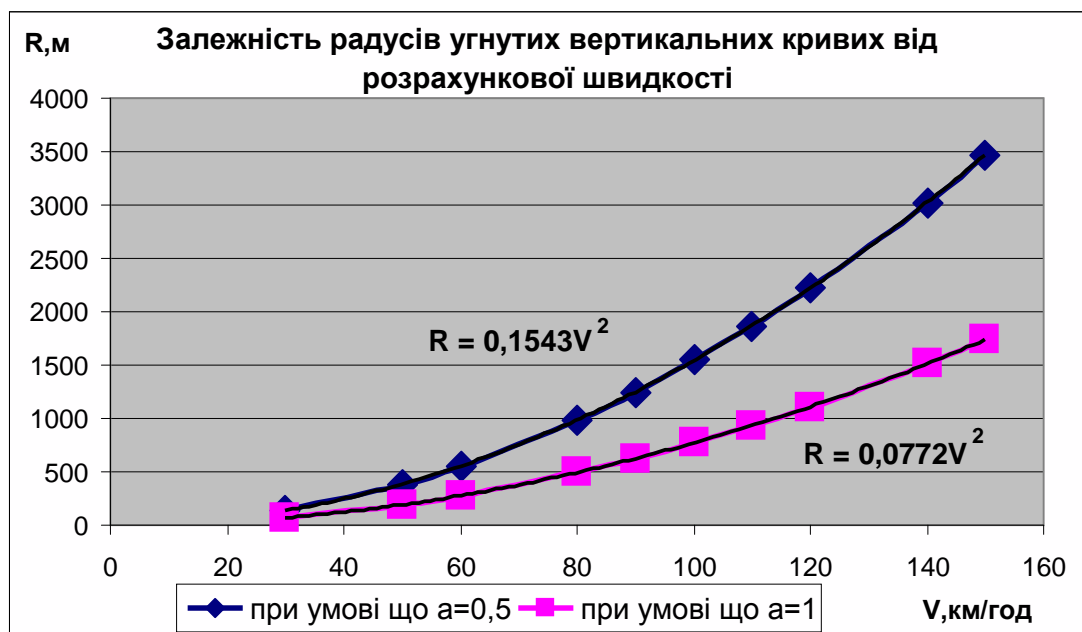


Рис. 1. Залежність радіусів угнутих вертикальних кривих від розрахункової швидкості, при умові що відцентрове прискорення $a = 0,5 \text{ м/сек}^2$ та $a = 1 \text{ м/сек}^2$, із визначенням степеневі залежності

Звідси можна зробити висновок, що при $a = 0,5 \text{ м/сек}^2$ рівняння визначення мінімального радіуса угнутої вертикальної кривої буде мати вигляд:

$$R = 0,1543V^2. \quad (5)$$

При $a = 1,0 \text{ м/сек}^2$:

$$R = 0,0772V^2.$$

(6)

У поздовжньому профілі при проектуванні вертикальних кривих, враховується відцентрове прискорення тільки для угнутих вертикальних кривих.

Відцентрове прискорення є різницею між вагою автомобіля і відцентровою силою. Через це, відцентрове прискорення має незначну величину, що не впливає на визначення радіуса опуклої кривої, у зв'язку з чим, радіус кривої визначається за допустимою відстанню і видимості поверхні дороги. Для угнутої вертикальної кривої ці сили сумуються і відцентрове прискорення збільшується. Через те, що відцентрове прискорення направлене вертикально вниз і не впливає на перекидання та ковзання автомобіля вниз, несприятливо впливає на психофізичний стан водія та пасажирів. Враховуючи дію відцентрового прискорення на водія та пасажирів, за даними медиків про вплив відцентрового прискорення на самопочуття пасажирів та водіїв, можна приймати $g = 1 \text{ м/сек}^2$, що дає можливість значно зменшити радіус угнутої вертикальної кривої.

Відцентрове прискорення приймається при розрахунку перевантажень при зльоті та посадці літаків – складає $1 \text{ м}^2/\text{сек}.$, тому враховуючи ці висновки, які викладені М.Г. Котиком, А.В. Павловим, И.М. Пашковским, Ю.С. Сардановским, Н.Г. Щитаевым щодо випробування літаків, приймаємо значення допустимого відцентрового прискорення рівним $1 \text{ м}^2/\text{сек}.$

Відцентрове прискорення визначається як перша похідна за часом, тому на прямолінійних ділянках ця характеристика рівна нулю.

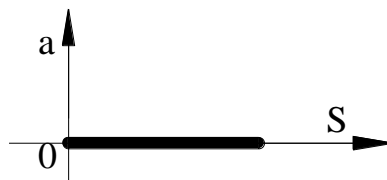


Рис. 2. Значення відцентрового прискорення на прямолінійних ділянках

При русі автомобіля по криволінійній ділянці відцентрове прискорення визначають за формулою:

$$a = \frac{v^2}{\rho}, \quad (7)$$

де v – швидкість, в м/сек²;

ρ – радіус кривизни у точці, що розглядається, м.

Зростання відцентрового прискорення, що визначається як перша похідна за часом:

$$I = \frac{da}{dt}. \quad (8)$$

На ділянках запроєктованих коловими кривими відцентрове прискорення має певне значення.

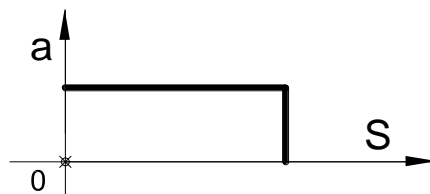


Рис. .3. Значення відцентрового прискорення на ділянках колових кривих

При використанні кубічної параболи, яка характеризується такими параметрами:

$$y = \frac{x^3}{6RL}, \quad (9)$$

$$C = L \times R, \quad (10)$$

де R – радіус кривизни в кінцевій точці кривої, м;

L – довжина кривої, м.

Відцентрове прискорення знаходимо за виразом:

$$\rho = \frac{[1 + (y')^2]^{3/2}}{|y''|}, \quad (11)$$

$$\rho = x \times \frac{\left[\frac{1 + x^4}{4c^2} \right]^{3/2}}{c}, \quad (12)$$

$$\frac{da}{dx} = \frac{v^2}{c} \times \frac{1 - 5x^4}{\left[\frac{1 + x^4}{4c^2} \right]^{5/2}}. \quad (13)$$

Маючи на увазі, що $\frac{da}{dx} = 0$, отримаємо:

$$x = \sqrt[4]{\frac{4c^2}{5}}, \quad (14)$$

$$a_{\max} = \frac{5}{6} \sqrt[4]{\frac{5}{9}} \times \frac{v^2}{\sqrt{c}} \approx 0,72 \frac{v^2}{\sqrt{c}}, \quad (15)$$

$$R = 1,2 \sqrt[4]{1,2} \times \sqrt{c} \approx 0,72 \sqrt{c}. \quad (16)$$

При русі по кривій кубічної параболи, яка змінюється на кут b , який при $x = x_1$ можна визначити з рівності:

$$\operatorname{tg} b = y'. \quad (17)$$

Враховуючи, що $y = \frac{x^3}{6RL}$, отримаємо $\operatorname{tg} b = \frac{1}{\sqrt{5}} \approx 0,4472$, звідки $b = 24^\circ 05' 44''$.

Зростання відцентрового прискорення визначається як похідна за часом:

$$I = \frac{da}{dx} \times \frac{dx}{dS} \times \frac{dS}{dt}, \quad (18)$$

$$\frac{dS}{dt} = v. \quad (19)$$

Виходячи із залежності: $dS = \sqrt{1 + (y')^2} dx, \quad (20)$

де dS елемент дуги кривої, отримаємо:

$$\frac{dx}{dS} = \frac{1}{\left[\frac{1 + x^4}{4c^2} \right]}, \quad (21)$$

$$I = \frac{v^3}{c} \times \frac{1 - 5x^4}{\left[\frac{1 + x^4}{4c^2} \right]^3}. \quad (22)$$

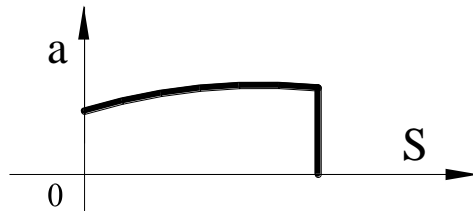


Рис. 4. Зміна відцентрового прискорення на криволінійних ділянках, що запроектовані параболою

На прямій входу на заокруглення (і на прямій виходу) наростання відцентрового прискорення дорівнює нулю, а при в'їзді автомобіля на криву, у якості якої використана кубічна параболою, на графіку на якому зображена зміна відцентрового прискорення, можна побачити стрибок із розривом. Такий стрибок буде мати місце і при виході з криволінійної ділянки.

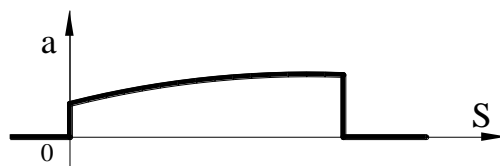


Рис. 5. Зміна відцентрового прискорення при поєднанні прямолінійної ділянки запроектованої прямою та криволінійної – параболою

Зміна відцентрового прискорення при поєднанні прямолінійної ділянки (прямої) та криволінійної ділянки (параболи), можна побачити що прискорення змінюється стрибкоподібно (рис. 5). Цей стрибок негативно впливає на динаміку руху автомобіля, несприятливо впливає на психофізичний стан водія та пасажирів. Відповідною реакцією водія, може бути зменшення швидкості руху.

Радіус кривизни клотоїди обернено пропорційний дузі S , тобто,

$$\rho = \frac{R \times L}{S}, \quad (23)$$

де L – довжина клотоїди, м;

R – радіус кривизни в кінці кривої, м.

Відцентрове прискорення при русі автомобіля змінюється за лінійною залежністю і формула приймає вигляд:

$$a = \frac{v^2 \times S}{RL} \quad (24)$$

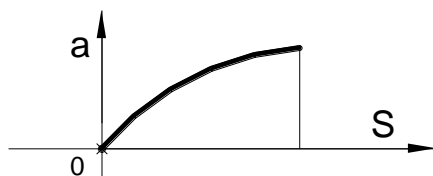


Рис. 6. Зміна відцентрового прискорення при русі автомобіля по криволінійній ділянці, що запроектована клотоїдою

З рис. 6, можна побачити, що при переході з прямолінійної ділянки на криволінійну, при наявності вертикальної кривої у якості клотоїди, забезпечено неперервність зростання відцентрового прискорення на всій довжині кривої, але на виході з криволінійної ділянки, запроектованої клотоїдою, виникає стрибок із розривом у значенні величини відцентрового прискорення. Стрибкоподібність зміни цієї характеристики несприятливо впливає на динаміку автомобіля і викликає дискомфорт у водія та пасажирів.

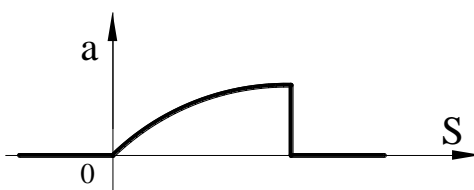


Рис. 7. Зміна відцентрового прискорення при поєднанні прямолінійної ділянки та криволінійної, запроектованою клотоїдою

Зростання значення відцентрового прискорення, що визначається як перша похідна за часом, для клотоїди:

$$a = \frac{v^3}{RL} \quad (25)$$

Для ліквідації перепаду значення відцентрового прискорення (при переході з прямолінійної ділянки на криволінійну, і навпаки) рекомендовано

використовувати криві змінного радіуса, що змінюють значення радіуса від нескінченності до певного мінімального значення.

Випадок I. Проектування червоної лінії поздовжнього профілю однією кривою змінного радіуса (за мінімальною довжиною).

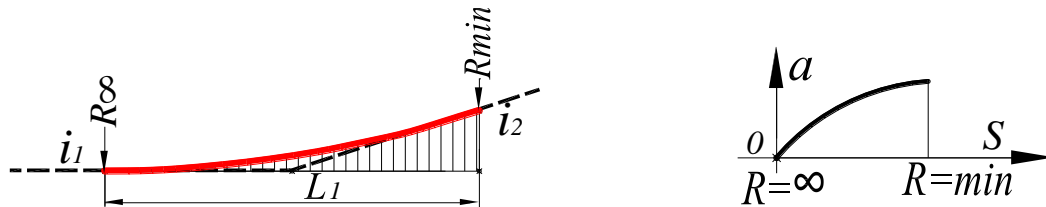


Рис. 8. Зміна відцентрового прискорення при проектуванні червоної лінії поздовжнього профілю однією кривою змінного радіуса, при похилах в один бік ($i_1 = +i_1, i_2 = +i_2$), при похилах, один з яких дорівнює нулю ($i_1 = +i_1, i_2 = 0$), та при похилах у різних напрямках ($i_1 = +i_1, i_2 = -i_2$)

Випадок II. Проектування червоної лінії поздовжнього профілю блоком з двох кривих змінного радіуса (за мінімальною довжиною).

При умові зміни $R \in (\infty, R_{min}] \cup [R_{min}, \infty)$

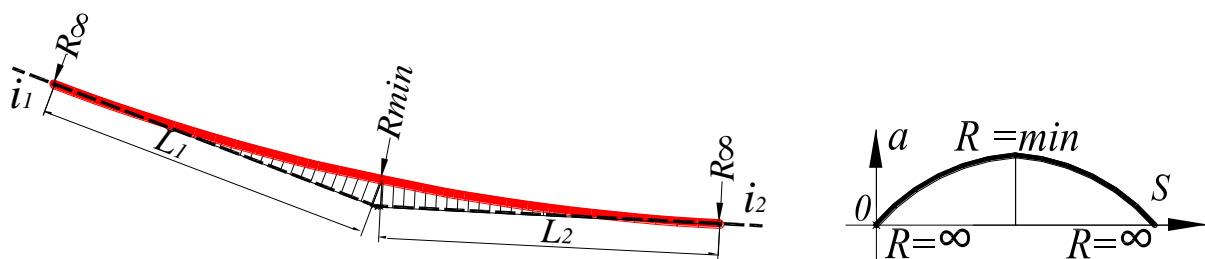


Рис. 9. Зміна відцентрового прискорення при проектуванні червоної лінії поздовжнього профілю блоком з двох кривих змінного радіуса (за мінімальною довжиною), при похилах в один бік ($i_1 = +i_1, i_2 = +i_2$), при похилах, один з яких дорівнює нулю ($i_1 = +i_1, i_2 = 0$) та при похилах у різних напрямках ($i_1 = +i_1, i_2 = -i_2$)

При умові зміни $R \in (R_{min}, \infty] \cup [\infty, R_{min})$

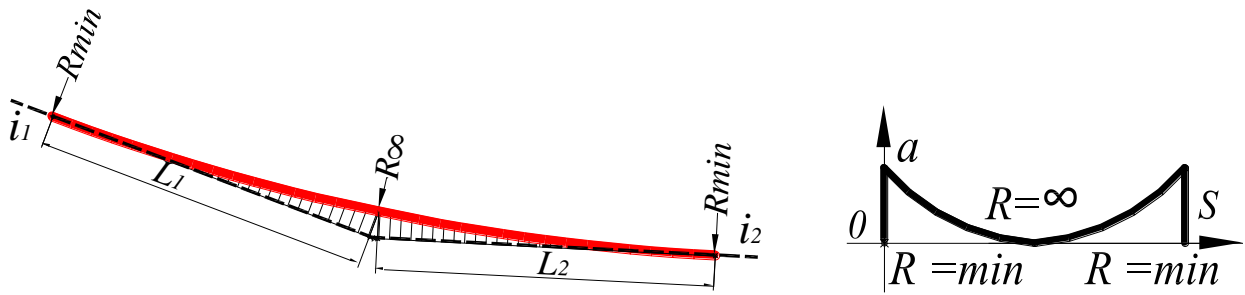


Рис. 10. Зміна відцентрового прискорення при проектуванні червоної лінії поздовжнього профілю блоком з двох кривих змінного радіуса (за мінімальною довжиною), при похилах в один бік ($i1 = +i1, i2 = +i2$), при похилах, один з яких дорівнює нулю ($i1 = +i1, i2 = 0$) та при похилах у різних напрямках ($i1 = +i1, i2 = -i2$)

Випадок III. Проектування червоної лінії поздовжнього профілю блоком з двох кривих змінного радіуса (зі здвижкою від точки перелому).

При умові зміни $R \in (\infty, Rmin] \cup [Rmin, \infty)$

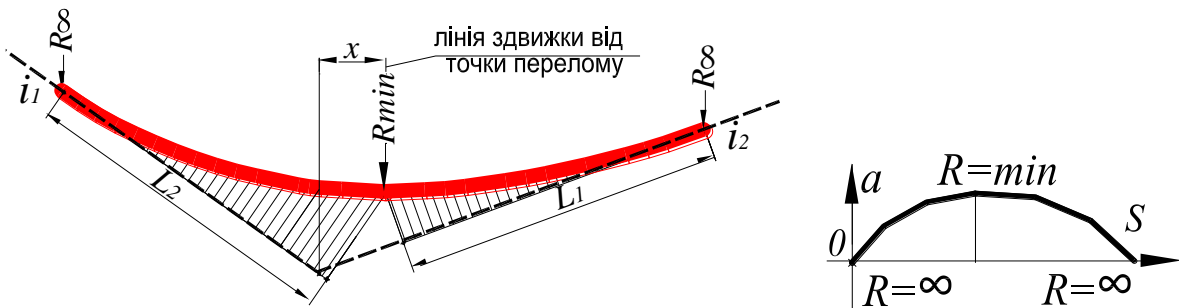


Рис. 11. Зміна відцентрового прискорення при проектуванні червоної лінії поздовжнього профілю блоком з двох кривих змінного радіуса (зі здвижкою від точки перелому), при похилах в один бік ($i1 = +i1, i2 = +i2$), при похилах, один з яких дорівнює нулю ($i1 = +i1, i2 = 0$) та при похилах у різних напрямках ($i1 = +i1, i2 = -i2$)

При умові зміни $R \in (Rmin, \infty] \cup [\infty, Rmin)$

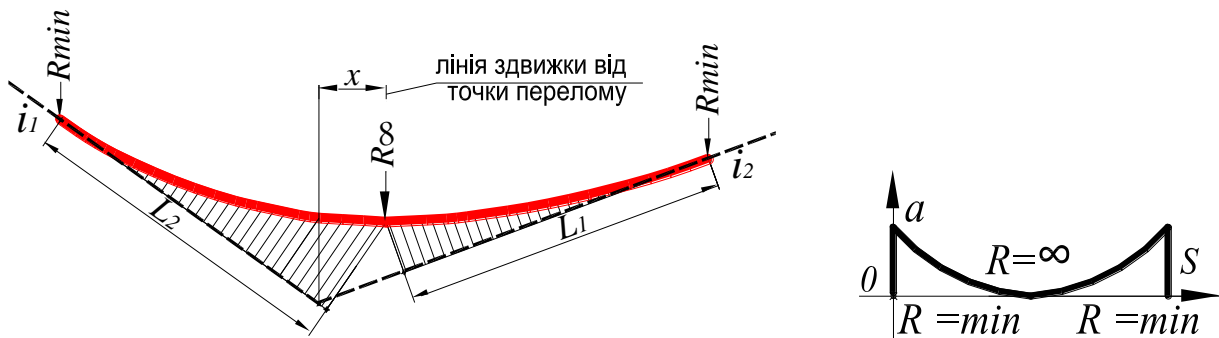


Рис. 1.12. Зміна відцентрового прискорення при проектуванні червоної лінії поздовжнього профілю блоком з двох кривих змінного радіуса (зі здвижкою від точки перелому), при похилах в один бік ($i1 = +i1, i2 = +i2$), при похилах, один з яких дорівнює нулю ($i1 = +i1, i2 = 0$) та при похилах у різних напрямках ($i1 = +i1, i2 = -i2$)

При проектуванні червоної лінії поздовжнього профілю угнутими вертикальними кривими зі змінним радіусом, для ліквідації перепаду значення відцентрового прискорення (при переході з прямолінійної ділянки на криволінійну, і навпаки) рекомендовано використовувати криві змінного радіуса що змінюють значення радіуса від нескінченності до певного мінімального значення. Для угнутої вертикальної кривої відцентрове прискорення направлене вертикально вниз і несприятливо впливає на психофізичний стан водія та пасажирів. За даними медиків про вплив відцентрового прискорення на самопочуття пасажирів та водіїв, приймається рівним 1 м/сек^2 , що дає можливість значно зменшити радіус угнутої вертикальної кривої.

Література

1. Андреев О.В. Справочник инженера-дорожника: изыскания и проектирование автомобильных дорог / Под ред. О.В. Андреева. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1977. – 560 с.
2. Бабков В.Ф. Проектирование автомобильных дорог. В 2-х ч. Ч. 1. / В.Ф. Бабков, О.В. Андреев. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1987. – 368 с.
3. Бабков В.Ф. Проектирование автомобильных дорог. В 2-х ч. Ч. 2. / В.Ф. Бабков, О.В. Андреев. Учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1987. – 415 с.
4. Білятинський О.А. Довідник: Проектування і будівництво автомобільних доріг / Білятинський О.А., Заворицький В.Й., Старовойда В.П. – К.: Техніка, 1996 – 382 с.
5. Бируля А.К. Проектирование автомобильных дорог: учебник для автодорож. ВУЗов. Ч. 1. – М.: Дориздат, 1948. – 392 с.
6. Бируля А.К. Проектирование автомобильных дорог: учебник для автодорож. ВУЗов. Ч. 2. – М.: Дориздат, 1948. – 348 с.
7. Бируля А.К. Справочник инженера-дорожника. – Изыскания и проектирование автомобильных дорог / Под ред. А.К. Бируля. – М.: Транспорт, 1969. – 552 с.