

## ВРАХУВАННЯ ЗСУВНИХ ЗУСИЛЬ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТРАС КАРТОДРОМІВ

Хазін В.Й.

Ерлі А.О.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Особливістю визначення параметрів проїзної частини трас картодромів є врахування значних гальмівних і зсувних зусиль, швидкості руху картів, а не навантаження, інтенсивність руху тощо, як для загальних автомобільних доріг. У зв'язку з відсутністю в Україні нормативної бази для проектування трас картодромів пропонується виконувати розрахунки з урахуванням технічних характеристик картів, аналізу параметрів існуючих трас картодромів, проведених експериментальних, натурних досліджень картодрому "Лтава" в м.Полтава з використанням спортивних правил по картингу Росії, Білорусії, України та існуючих норм проектування автодоріг.

Всі запропоновані розрахунки розроблені з урахуванням конструктивних властивостей карту "Союзний" групи національних класів [5], з наступними технічними характеристиками: маса  $m = 150$  кг; база  $L = 1820$  мм; колія  $K = 800$  мм; ширина кузова  $C = 1400$  мм; відстань від центра мас до поверхні дорожнього полотна  $h = 300$  мм.

Як показують спостереження, навіть при прагненні водія їхати точно по прямому напрямку, автомобіль рухається по деякій синусоїдальній траєкторії. Відхилення цієї траєкторії від прямої тим більше, чим вища швидкість руху. Тому чим вища швидкість руху автомобіля, тим більша ширина смуги руху йому потрібна на проїзній частині.

Необхідна ширина смуги руху складається із ширини кузова карту і відстані від кузова до краю суміжної смуги руху і від колеса до кромки проїзної частини. На ці відстані впливають індивідуальні особливості водія. Тому необхідні їх значення можуть бути встановлені на основі формул визначених в результаті спостережень [1].

Максимальну швидкість визначаємо з двох умов.

Максимально допустиму безпечну швидкість руху карту по кривій з умов перекидання визначається за формулою:

$$V_{max} = \sqrt{127R_n \left( \frac{K}{2h} + i_n \right)} \quad (1)$$

де  $R_n$  – радіус повороту, м;

$K$  – ширина колії карту, м;

$h$  – відстань від центра ваги карту до поверхні дорожнього полотна, м;

$i_n$  – поперечний ухил проїзної частини, приймаємо  $i_n = 30$  ‰.

Максимально допустиму безпечну швидкість руху карту по кривій визначається з умов стійкості проти зсуву по зовнішній смузі руху за формулою:

$$V_{max} = \sqrt{127R_n (\varphi_n + i_n)} \quad (2)$$

де  $R_n$  – радіус повороту, м;

$\varphi_n$  – коефіцієнт поперечного зчеплення колеса карту з поверхнею дорожнього покриття (приймаємо в розрахунках  $\varphi_n = 0,35\varphi$ );

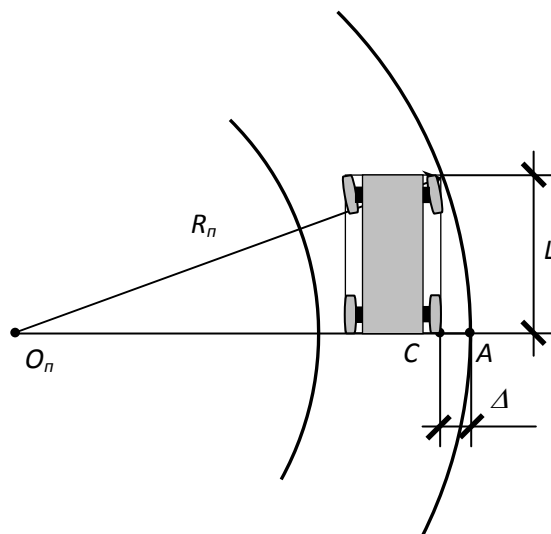
$i_n$  – поперечний ухил проїзної частини 30 ‰.

У відповідності з наведеними формулами визначені максимально допустимі швидкості з умов перекидання та зсуву карту, які наводяться в таблиці 1.

**Таблиця 1** – Максимальна допустима швидкість карту при русі по кривій в залежності від величини радіусу повороту

	Максимальна допустима швидкість руху при радіусі повороту $R_n$ , м									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
З умови перекидання, $V_n$ , км/год	100	140	170	200	220	240	260	280	295	310
З умови зсуву, $V_z$ , км/год	42	60	75	85	95	105	115	120	130	135

При повороті карту кожне його колесо рухається по самостійній траєкторії, внаслідок чого ширина смуги проїзної частини, що займає автомобіль, збільшується. Щоб умови руху по кривій були аналогічні умовам руху на прямій ділянці, проїзну частину на кривих малих радіусів потрібно розширяти (рис. 1). Виходячи із припущення, що траєкторія руху автомобіля в межах кривої є колом, можна одержати приблизну величину потрібного розширення однієї смуги руху на кривій.



*Рис. 1. Схема для визначення ширини розширення дорожнього полотна*

Величина розширення односмугової проїзної частини вираховується за формулою:

$$\Delta = l^2 \cdot 2R + \frac{0.05V}{3.6\sqrt{R_n}} \quad (3)$$

де  $l$  – довжина транспортного засобу, м;  
 $V$  – швидкість руху, км/год.

Визначимо розрахункові швидкості в залежності від величини радіусу повороту. Швидкість руху залежить від багатьох факторів: індивідуальна майстерність водія, конфігурація траси, манера водіння карту, радіус повороту і т. ін. На основі обґрунтування даних методів можливо визначити загальну розрахункову швидкість руху на кривих в плані.

Для спрощення розрахунків зробимо припущення:

- що швидкість проходження поворотів пропорційно зростає зі збільшенням величини радіусу повороту. На рис. 2. видно дану закономірність розвитку швидкості. Для побудови швидкостей  $V_n$  і  $V_3$  були використані дані табл. 1;
- більш круті повороти (з малим радіусом повороту) водій долає переважно з боковим ковзанням. Тому розрахункову швидкість потрібно визначати з умов перекидання карту. Початкову швидкість приймемо для радіусу  $R_n = 5$  м. З метою створення безпечного руху картів на поворотах зменшимо дану швидкість на 20 %;
- повороти з більшим радіусом проходяться з усталеним коловим рухом без виникнення бокового ковзання. Розрахункову швидкість в такому випадку потрібно визначати з умов зсуву транспортного засобу по смузі руху. Як показали спостереження, приблизно 30 % всіх водіїв, що приймають участь у змаганнях, перевищують дану швидкість і долають поворот з виникненням бокового заносу. Тому для розрахунку визначену швидкість з умов зсуву перемножимо на коефіцієнт 1,3. Кінцеву швидкість приймемо для радіусу повороту  $R_n = 50$  м.

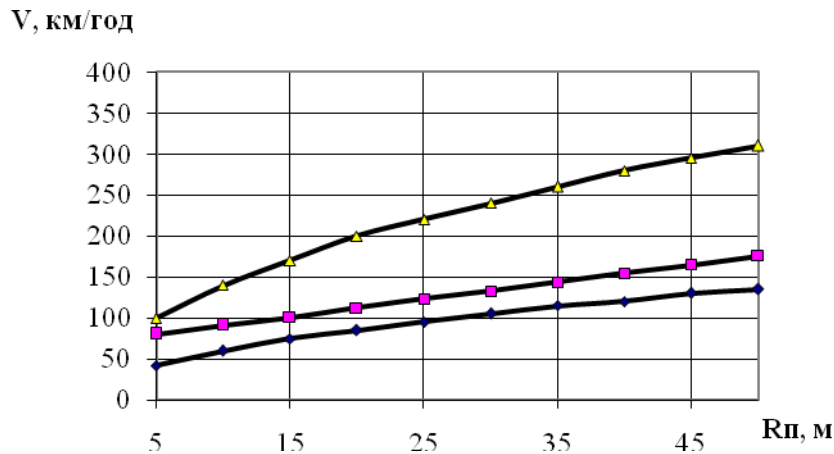


Рис. 2. Графік максимальних швидкостей на кривих в плані

На основі розрахованих швидкостей визначимо величину розширення смуги руху на кривих в плані за формулою (3). Для спрощення отримані значення наводяться в таблиці 2 в подальшому дані швидкості використовуються як основні для розрахунків.

Таблиця 2 – Мінімальна величина розширення смуги руху на кривих

	Мінімальна величина розширення при радіусі повороту $R_n$ , м									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Розрахункова швидкість, $V_n$ , км/год	80	91	101	112	123	133	144	155	165	176
Величина розширення, $\Delta$ , м	0,82	0,57	0,47	0,43	0,41	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38

Для подальших розрахунків використані положення теоретичної механіки, зокрема теорію руху автопоїздів та двохвісних автомобілів.

Сили, що виникають при повороті автомобіля, викликають відвід коліс. Це приводить до відхиленню напрямків швидкостей  $V_a$  і  $V_b$  (рис. 3) на кути  $\delta_1$  і  $\delta_2$  – відхилення залежать також від розвалу коліс. Крім того, в результаті кінематики підвісок коліс поперечний нахил (крен) кузова приводить до повороту керованих коліс в ту чи іншу сторону.

Виходить, що карт рухається не по сліду коліс, а по якомусь іншому напрямку. Чим більша поперечна еластичність шини, тим менше шина опирається дії бокової сили і тим більший кут відводу. Здатність шини опиратися відводу оцінюється коефіцієнтом опору відводу. Він рівний боковій силі, необхідній для повороту шини на  $1^\circ$ . Коефіцієнт опору відводу шини тим більше (і відвід менше), чим більше її зовнішній діаметр, її ширина і внутрішній тиск в ній.

Миттєвим центром повороту карту є точка  $O_n$  перетину перпендикулярів до напрямків швидкостей  $V_a$  і  $V_b$  (рис. 3.)

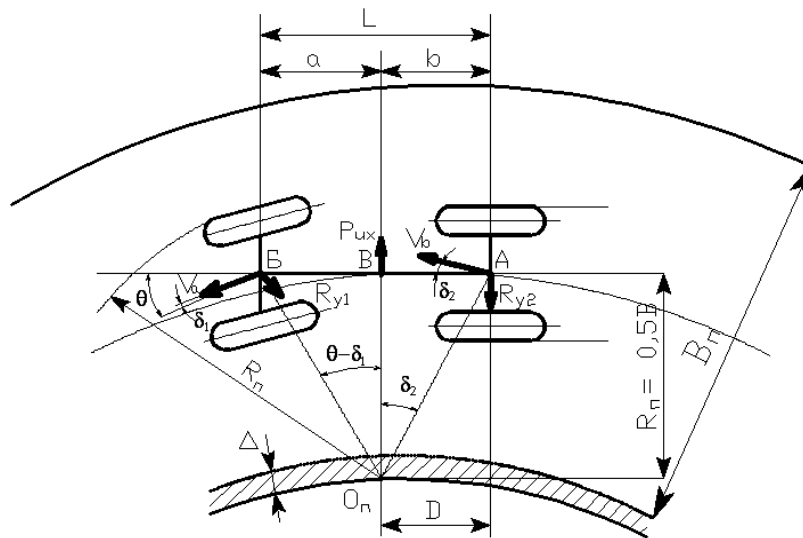


Рис. 3. Схема повороту двохвісного автомобіля (типу карт)

Розглянувши трикутники  $\Delta A O_n B$  і  $\Delta B O_n B$ , маємо:

$$R_n = \frac{L}{\operatorname{tg}(\Theta - \delta_1) + \operatorname{tg} \delta_2} \approx \frac{L}{\Theta - \delta_1 + \delta_2} \quad (4)$$

Радіусом повороту  $R_n$  автомобіля називають відстань від центру повороту  $O_n$  до колії переднього зовнішнього колеса.

$$R_n = \frac{R + 0.5K}{\cos(\Theta - \delta_1)} = \frac{0.5(B_n + \Delta) + 0.5K}{\cos(\Theta - \delta_1)} \quad (5)$$

де  $\Theta$  – кут повороту коліс;

$\delta_1$  – відвід коліс, визначається за формулою (5);

$K$  – колія карту (відстань між зовнішніми гранями сліду найбільш віддалених коліс), м;

$\Delta$  – розширення проїзної частини, яке визначається за формулою (3), м;

$B_n$  – ширина проїзної частини, м.

$$\delta_1 = \Theta - \operatorname{arctg} \frac{a}{R_n} \quad (6)$$

При русі карту на кривих в плані, виникають бокові дотичні зусилля. На розрахунковій схемі (рис. 4.) показано реакції дорожнього полотна ( $R_{y1}$ ,  $R_{y2}$ ,  $R_{x1}$ ,  $R_{x2}$ ) та сили, які викликають ці реакції ( $P_{uy}$ ,  $P_{ux}$ ). Знаючи сили інерції і врахувавши відомі зовнішні сили, можливо, використавши принцип Даламбера, знайти ці реакції дорожнього полотна.

Для визначення поперечних реакцій  $R_{y1}$  та  $R_{y2}$  (рис. 4.) складемо рівняння моментів. Вважаючи  $\cos \Theta = 1$  і  $\sin \Theta = 0$  знайдемо:

$$J_z d^2 \gamma / dt^2 - J_z \varpi_a = (R_{y1} - R_{x1} \Theta) a - R_{y2} b \quad (7)$$

де  $J_z$  – момент інерції карту відносно вертикальної осі  $z$ , що проходить через його центр мас.

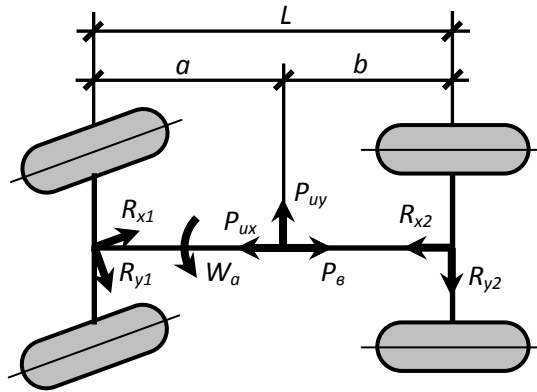


Рис. 4. Схема сил і бокових (зсувних) зусиль, що діють на карту при повороті

З умов рівності нулю проекцій сил на поперечну вісь:

$$P_y = R_{y1} + R_{y2} - R_{x2} \Theta \quad (8)$$

Так як передні колеса не ведучі і  $\Theta$  невелике, то членом  $R_{x1} \Theta$  можна знехтувати. Вирішуючи сумісно рівняння (6) і (7) отримаємо:

$$R_{y1} = (P_{uy} b + J_z \varpi_a) / L; \quad (9)$$

$$R_{y2} = (P_{uy} a - J_z \varpi_a) / L$$

Враховуючи значення  $\varpi_a$  та  $P_{uy}$ , також вважаючи  $J_z = m_a \rho_z^2$ , ( $\rho_z$  – радіус інерції),  $\rho_z^2 = ab$  отримаємо:

$$R_{y1} = m_{a1} [V^2 / R + V(\Theta - \delta_1) + j(\Theta - \delta_1)]; \quad (10)$$

$$R_{y2} = m_{a2} (V^2 / R - V\delta_2 - j\delta_2)$$

де  $\Theta$  – швидкість зміни кута повороту керованих коліс;

$j = dV/dt$  – прискорення руху карту;

$\delta_1, \delta_2$  – кути відводу.

Всі існуючі картодроми мають певну конфігурацію доріжки, більшу частину якої складають повороти. Сумарна довжина прямих ділянок значно менша від довжини кривих в плані. Тому рух картів потрібно розглядати з урахуванням дії бокової (зсувної) сили, а саме ця сила зумовлює відвід коліс.

Розглянемо детальніше формули (10). При русі по колу (в середині повороту)  $\Theta = const$ ,  $R = const$ . Між ними існує залежність:

$$\Theta = \operatorname{arctg} \frac{L}{R_n} \quad (11)$$

Тобто кут повороту керованих коліс залежить від радіусу кривої в плані. На вході в поворот  $\Theta$  змінюється за певним законом в залежності від часу зміни кута повороту коліс від початкового до потрібного (кінцевого). Цей процес продовжується до того часу, поки характерна точка (знаходиться на зовнішній грані керованого колеса) не почне рухатися по потрібному радіусу. Знаючи кінцеве значення кута повороту і час за який відбувається зміна  $\Theta$  можливо знайти його значення. Як показали дослідження [2, 8], проведені в ході змагань, цей процес триває на протязі 1-3 с. Для розрахунків прийємо середнє значення 2 с. За цей час відбувається і зміна швидкості руху від початкового до потрібного значення. На основі спостережень за розвитком швидкості картів під час змагань (зокрема на поворотах) отримаємо прискорення  $j = -3,3 \text{ м/с}^2$ .

Кути відводу  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  для спрощення прийємо постійними на протязі всього повороту. Вони знаходяться за наступними формулами:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \Theta - \operatorname{arctg} \frac{a}{R_n} ; \\ \delta_2 &= \operatorname{arctg} \frac{b}{R_n} \end{aligned} \quad (12)$$

Підставивши формули (11) і (12) у формулу (10) отримаємо:

$$\begin{aligned} R_{y1} &= m_{a1} \left( \frac{V^2}{R} + \frac{V \cdot \operatorname{arctg} L}{2R_n} + j \cdot \operatorname{arctg} \frac{a}{R_n} \right); \\ R_{y2} &= m_{a2} \left( \frac{V^2}{R_n} - j \cdot \operatorname{arctg} \frac{b}{R_n} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

де  $L$  – база карту, м;

$R$  – радіус повороту, м;

$j$  – прискорення руху карту на вході в поворот, м/с<sup>2</sup>;

$V$  – швидкість руху карту в середині повороту, м/с;

$b$ ,  $a$  – відстані відповідно від задньої та передньої осей до центру мас карту, м (рис. 4.).

Розрахунок бокових (зсувних) дотичних зусиль виконаємо в табличній формі, та визначимо питомий тиск на покриття, що спричиняє карт в результаті руху на повороті.

**Таблиця 3** – Розрахунок величини бокових дотичних зусиль

Радіус повороту, $R_n$ , м	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Розрахункова швидкість, $V$ , м/с	22,2	25,3	28,1	31,1	34,2	36,9	40,1	43,1	45,8	48,9
Зусилля від задньої осі, $R_{y2}$ , кН	10,9	10,4	8,16	7,26	6,58	6,15	5,98	5,84	5,70	5,68
Зусилля від передньої осі, $R_{y1}$ , кН	11,3	7,0	5,6	4,97	4,7	4,5	4,49	4,48	4,47	4,55
Питомий тиск на покриття, $\rho$ , МПа	2,22	1,14	1,37	1,22	1,13	1,07	1,05	1,03	1,02	1,02

Розрахунок конструкції дорожнього одягу будемо виконувати виходячи з питомого тиску на покриття, який виникає при проходженні кривої на радіусом  $R = 5$  м в плані.

### Література

1. Білятинський О.А., Заворицький В.Й., Старовойда В.П., Хом'як Я.В. Проектування автомобільних доріг. – К.: Вища школа, 1997.
2. Долматовский Ю.А. Автомобиль в движении. – М.: Транспорт, 1987. – 159с.
3. Звіт "Про технічний стан картодрому "Лтава". / Полтава: Полтавський державний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 1998. – 80 с.
4. Классификация й технические требования к автомобилям участвующим в спортивных соревнованиях. – М.: Изд-во ДОСААФ СССР, 1988. – 125 с.
5. Уриханян Х.П. Картинг – спорт юных. – М.: Изд-во ДОСААФ СССР, 1988. – 133с.