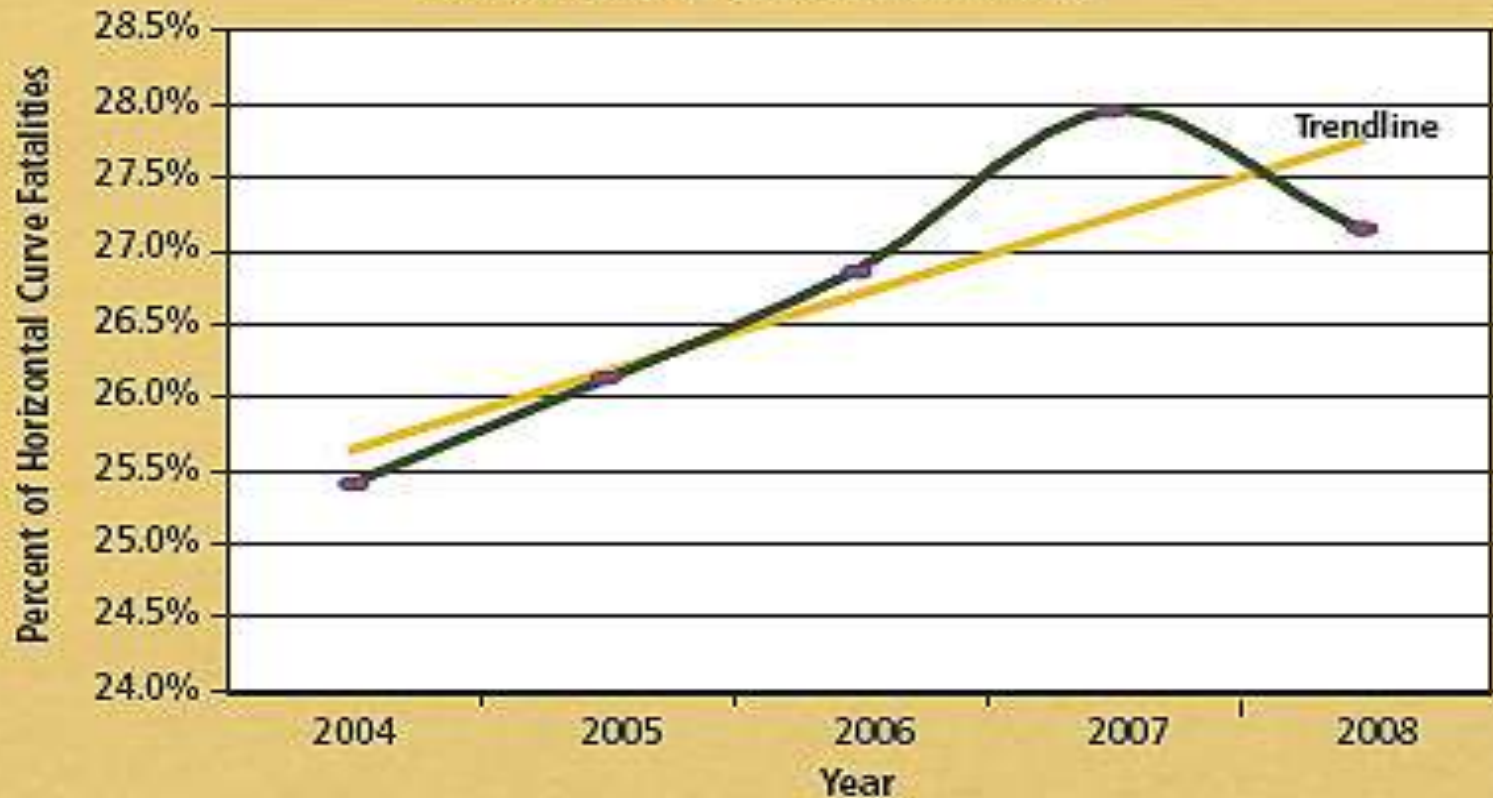


Безопасность криволинейного движения с переменной скоростью

Главный конструктор
компании «Кредо-Диалог»
Величко Г.В.



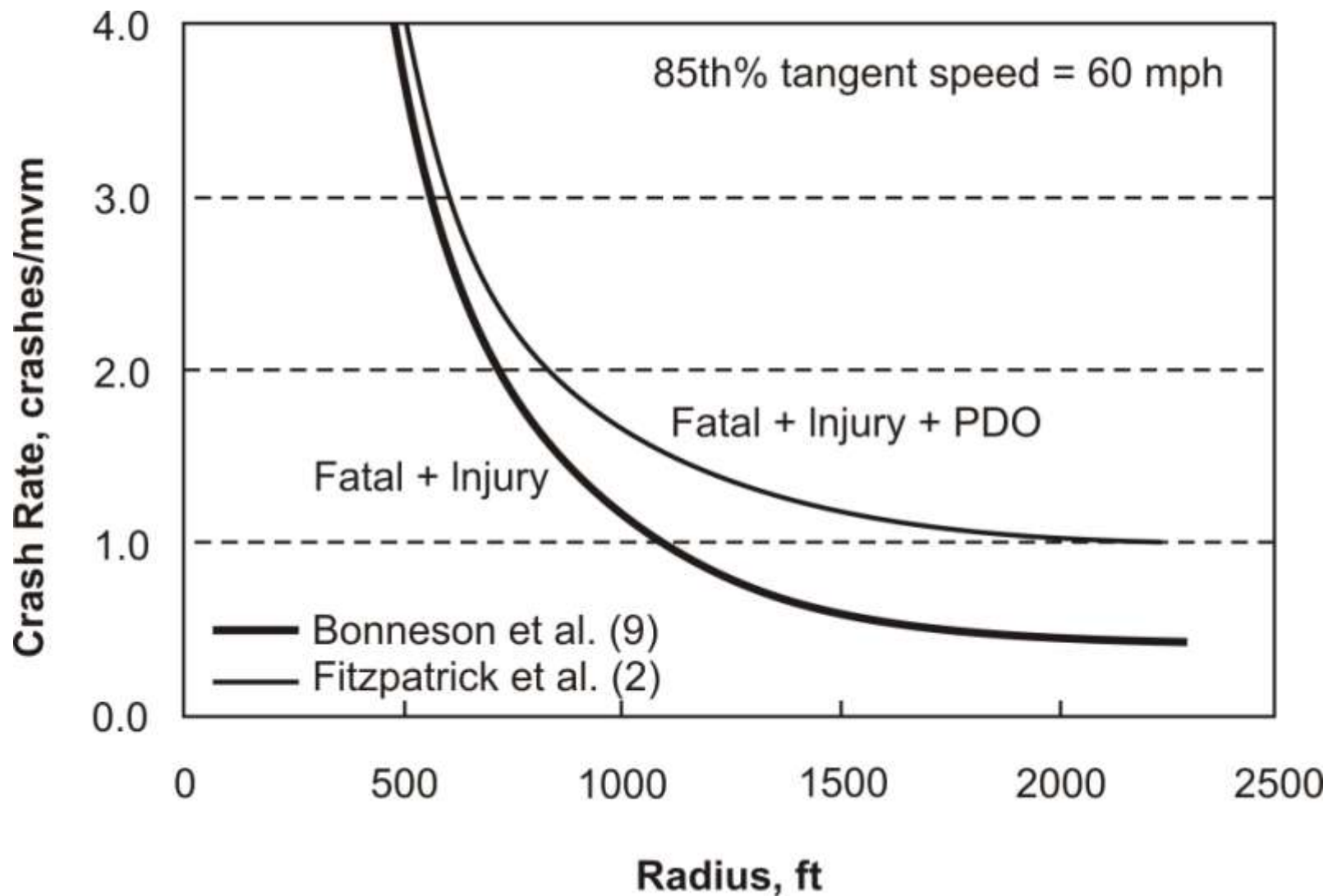
Crash Fatality Percentages on Horizontal Curves 2004–2008 (Nationwide)



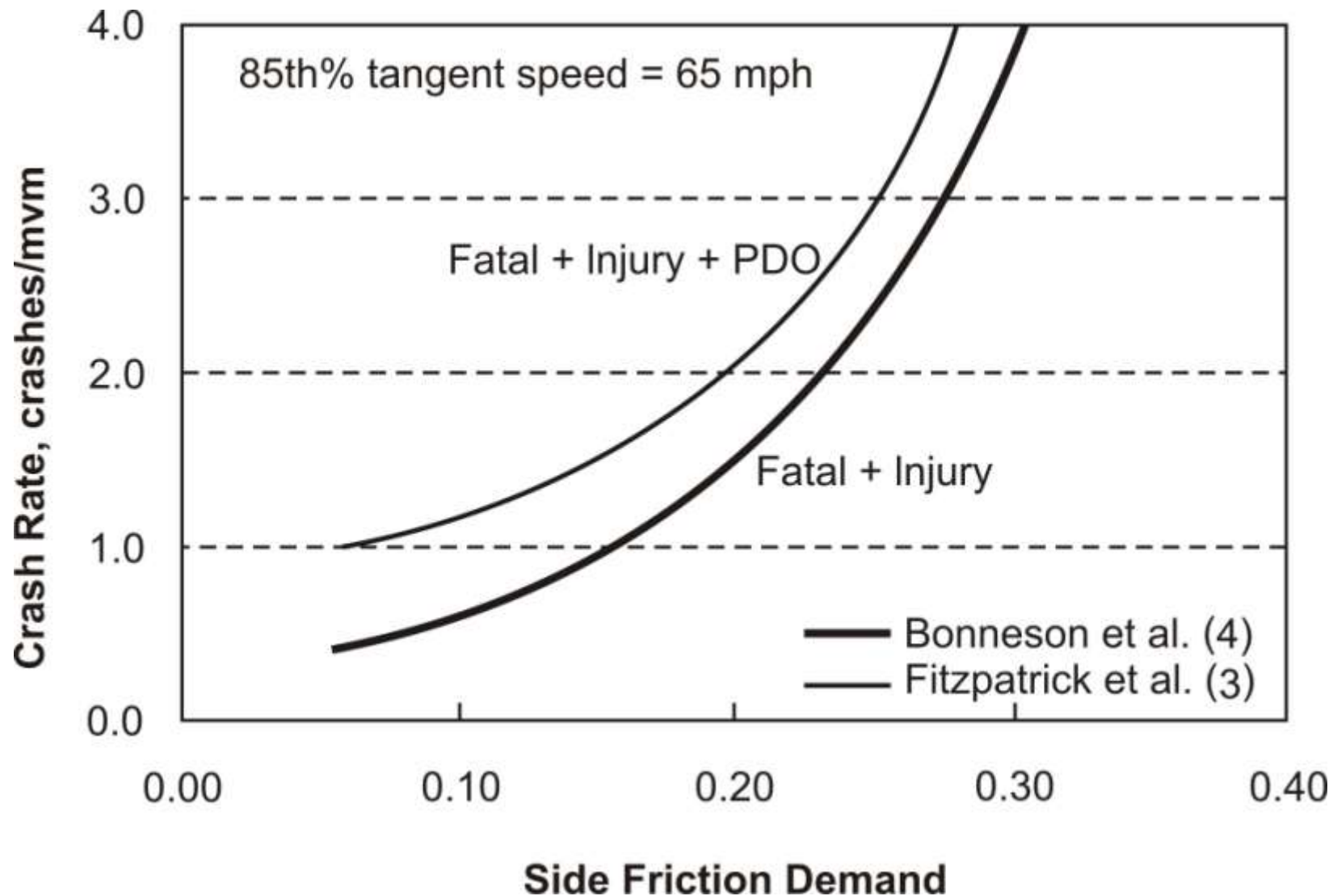
Source: FHWA

Высокий уровень аварийности горизонтальных кривых показывает, что соблюдение существующих норм и правил геометрического проектирования дорог является необходимым, но не достаточным условием обеспечения их безопасности

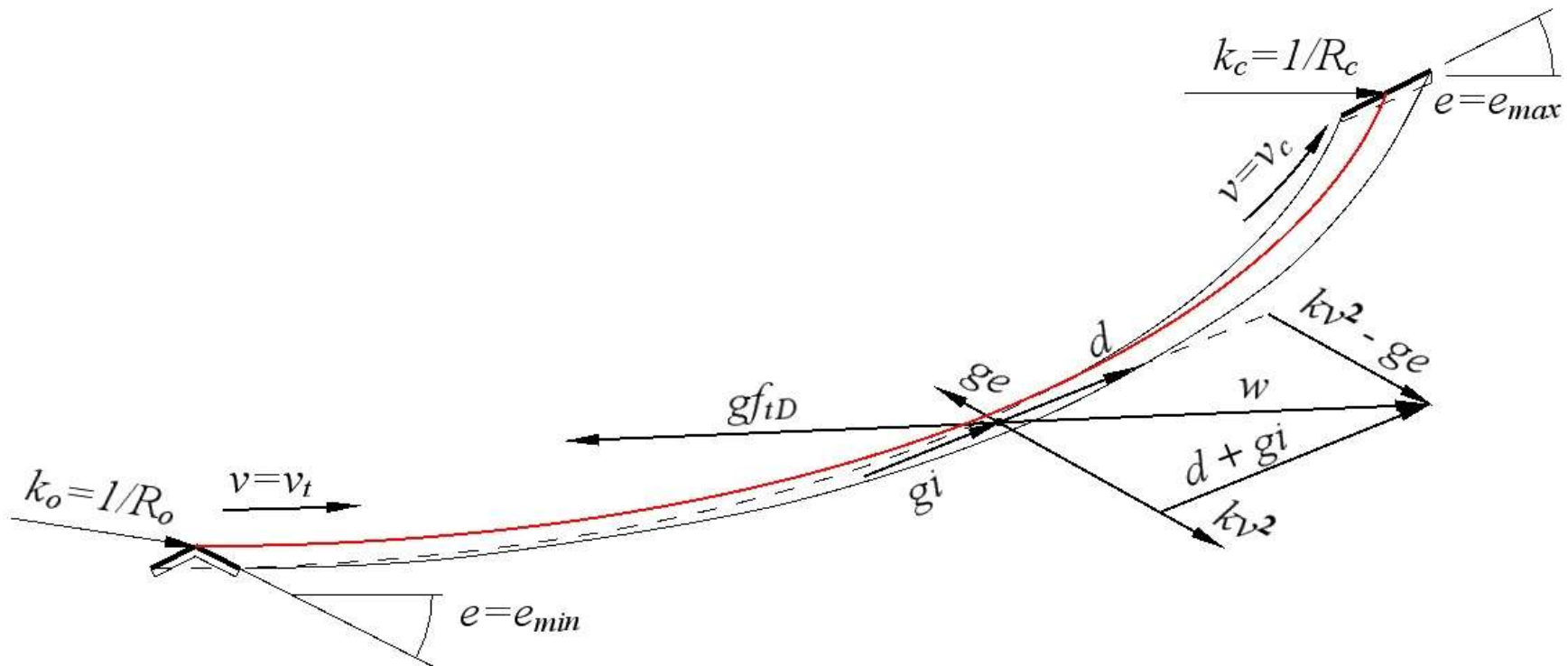
Зависимость числа ДТП от радиуса закругления R



Зависимость числа ДТП от величины требуемого коэффициента сцепления f_D



Расчётная схема криволинейного движения с переменной скоростью



L = длина криволинейной траектории, м;
 k_0 = кривизна начальная, m^{-1} ;
 k_c = кривизна конечная, m^{-1} ;
 d = замедление, m/c^2 ;
 v_t = скорость начальная, м/с;
 k_v^2 = ускорение центробежное, m/c^2 ;

e = уклон поперечный;
 i = уклон продольный;
 f_{td} = сцепление требуемое;
 $g = 9,81$, m/c^2 ;
 v_c = скорость конечная, м/с;
 w = ускорение общее, m/c^2 .

Критерий безопасности криволинейного движения с переменной скоростью

$$f_D \leq f$$

Где:

$$f_D = a \times f_{tD}$$

$$f_{tD} = \sqrt{(kv^2 - ge)^2 + (d + gi)^2} / g$$

$$v = \sqrt{v_t^2 + 2dl}, \quad 0 \leq l \leq L$$

a = коэффициент зависимости коэффициента поперечного сцепления f_s от общего f_t ($a \approx 0.925$);
 f = нормируемый по расчётной скорости коэффициент поперечного сцепления (AASHTO)



$$f = 0,5544 - 0,0124V + 1.27V^2 \times 10^{-4} - 4.58V^3 \times 10^{-7}$$

Повышенный риск клотоид при $V \neq \text{const}$

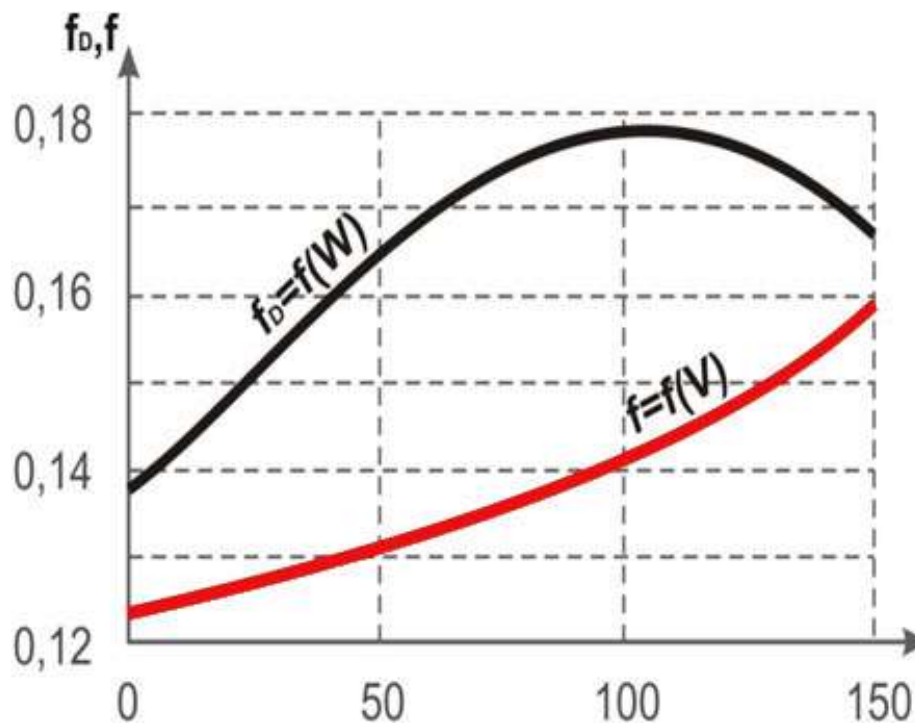
Данные для расчёта f_D :

$k_0=0 \text{ м}^{-1}$, $k_c=1/200 \text{ м}^{-1}$, $V_t=97 \text{ км/ч}$ (60 mph), $V_c=64 \text{ км/ч}$ (40 mph),

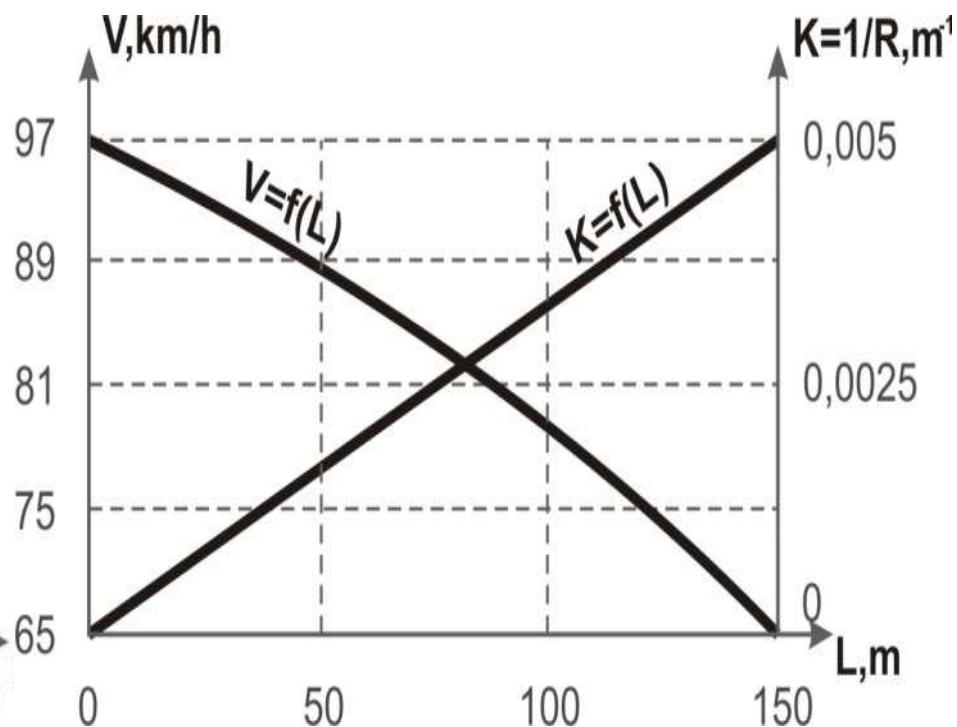
$i=-0,01$, $e_{\min}=-0,025$, $e_{\max}=0,06$,

$d=-1,3 \text{ м/с}^2$, $L=150 \text{ м}$ ($\beta = 21^\circ 30'$)

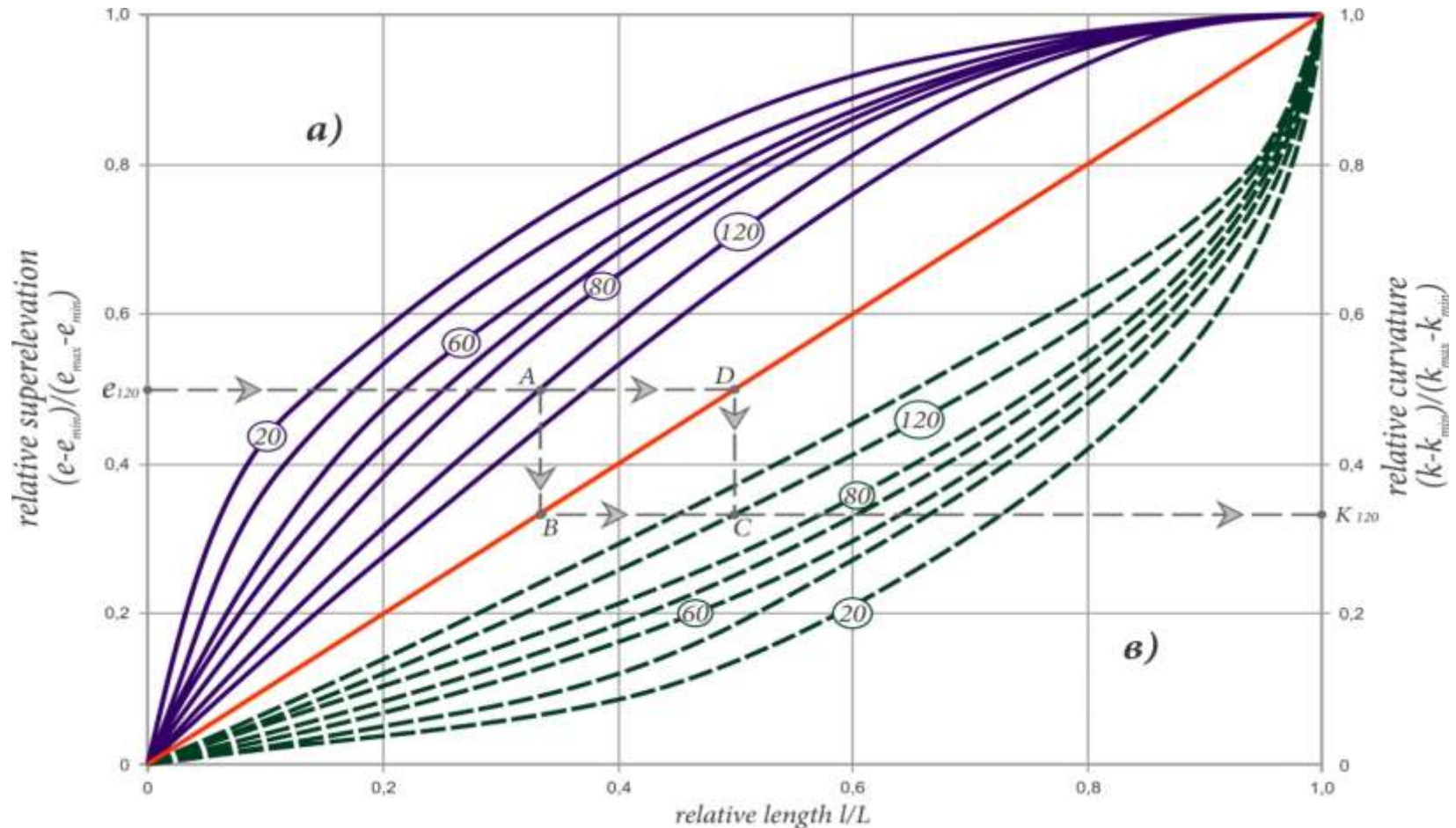
Требуемый (f_D) и предельный (f_{AASHTO}) коэффициенты сцепления



Переменная скорость и кривизна клотоиды



Альтернативы стратегий повышения безопасности криволинейного движения с $V \neq \text{const}$



А) – нелинейный отгон виража e (5-й метод AASHTO)

В) – нелинейная закономерность кривизны переходных кривых

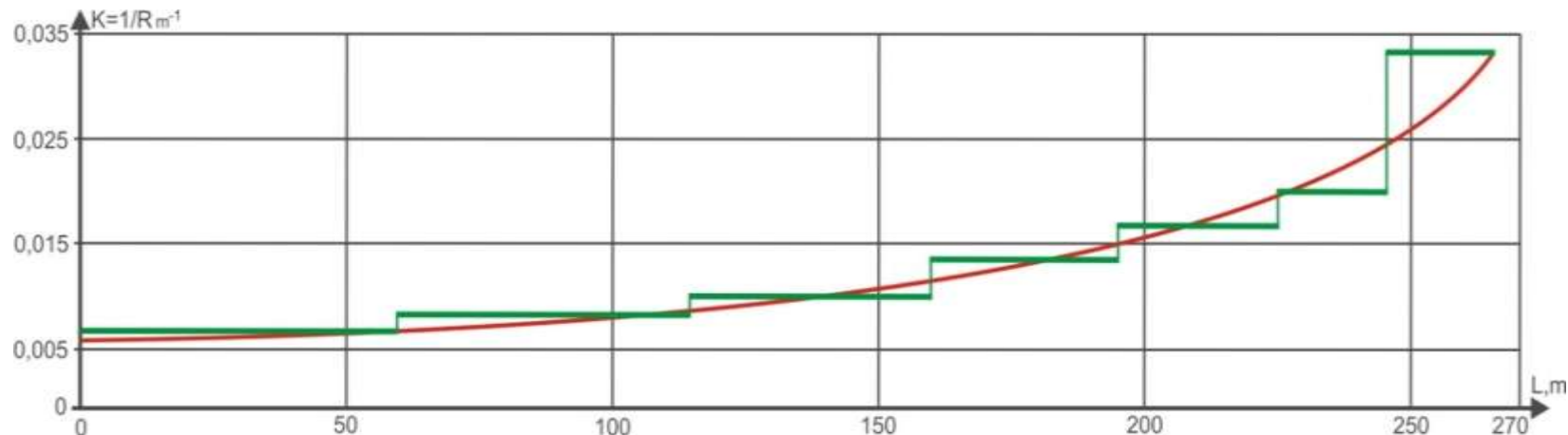
Преимущества альтернативы согласования кривизны и скорости:

- более комфортный вираж без критичных ограничений по темпу его отгона;
- увеличение длин переходных кривых за счёт уменьшения угла дуги β ;
- усиление самопоясняющих (*Self-Explaining*), саморегулирующих (*Self-Enforcing*) и «гуманных» (*Forgiving*) свойств трасс.

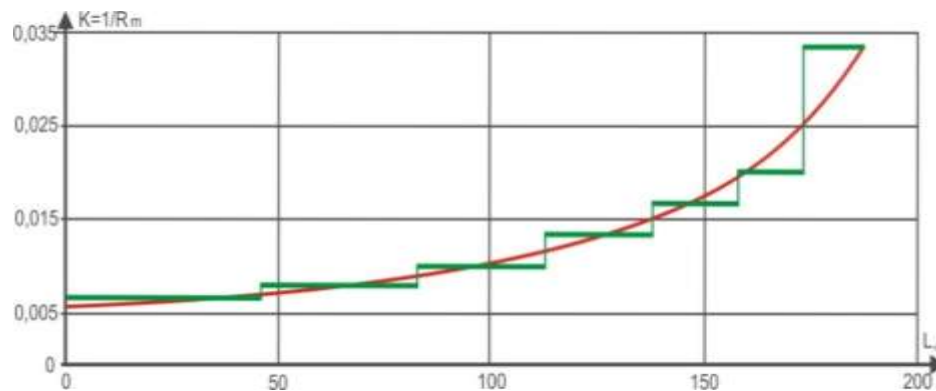
Примеры согласования кривизны и скорости в нормах США

Эмпирические закономерности кривизны *Compound Circular Curves*

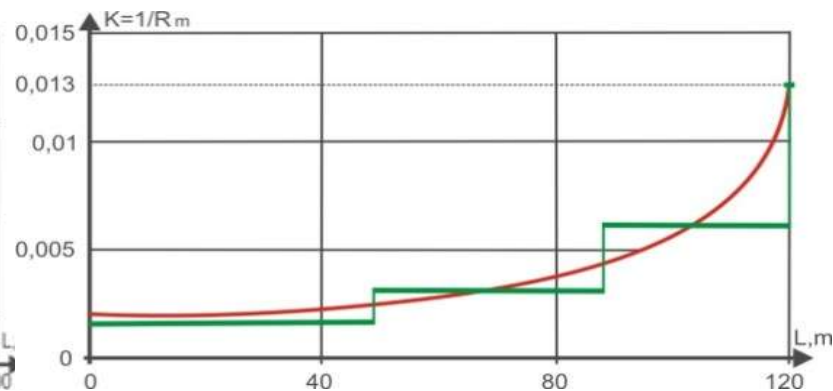
а) Рекомендуемая длина, AASHTO, Табл. 3-42



б) Минимальная длина, AASHTO, Табл. 3-42



в) Joel P. Leisch, Табл 3-9



Недостатки эмпирических методов согласования кривизны и переменной скорости

Общие параметры			Приближения CCC					
			Параметры CCC		$k_i \approx f(R_0, R, L, d), d = f(r_n, l_n) \quad 1 \leq n \leq N,$ $d_{wb} = -0,8 \text{ м/с}^2$			
$L, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$\beta, \text{ } \underline{\text{г.м}}$	$R_0, \text{ м}$	$N \text{ arcs}$	$R_0, \text{ м}$	$V, \text{ км/ч}$	$d, \text{ м/с}^2$	$C, \underline{\text{м/с}^3}$
265	30	190°25'	150	7	167	30	-0,60	-0,11
182	30	128°43'	150	7	171	30	-0,90	0,06
120	75	23°52'	600	4	730	50	-7,02	2,30

- При избыточном комфорте ($C \approx 0 \text{ м/с}^3$) критичны к дисперсии скоростей и замедлений d_{wb} ;
- При учёте дисперсии d_{wb} ($|d| > -7 \text{ м/с}^2$) не обеспечен комфорт ($C \approx 2,3 \text{ м/с}^3$);
- Сложно согласовывать пропорций r_n/r_{n-1} и l_n/l_{n-1} с ограничениями по углу β и сдвиги круговых кривых p ;
- Нет методики применения в конструкциях горизонтальных закруглений.

Согласование кривизны с переменной скоростью движения

Критерий согласования:

$$J = d \left(\sqrt{(k v^2)^2 + d^2} \right) / dt = \text{const}$$

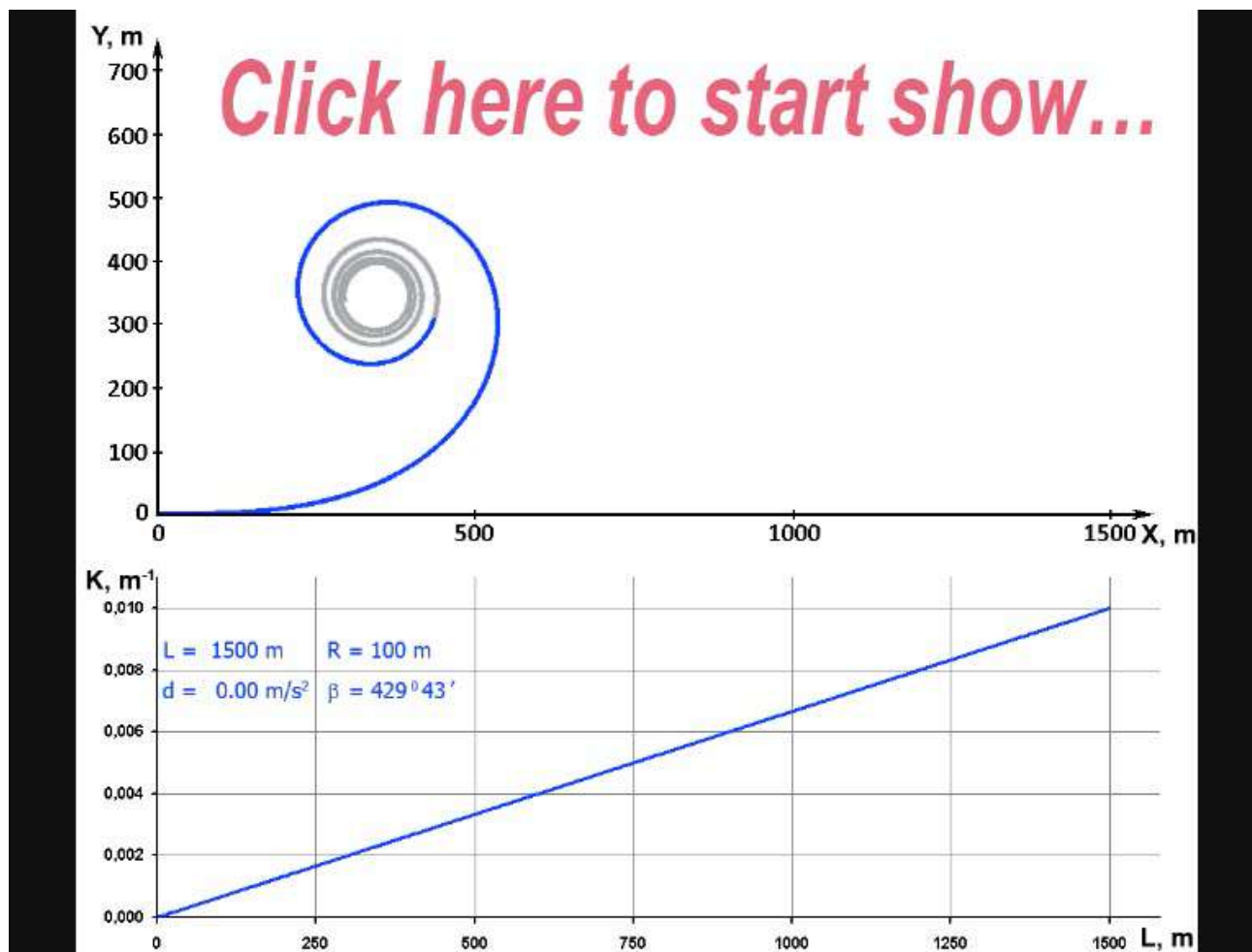
Закономерность кривизны VGV_Kurve:

$$k_l = \frac{\sqrt{\left(\sqrt{((v_c^2 - 2dL)k_0)^2 + d^2} + \frac{2Jl}{\sqrt{v_c^2 - 2d(L-l)} + \sqrt{v_c^2 - 2dL}} \right)^2 - d^2}}{v_c^2 - 2d(L-l)}$$

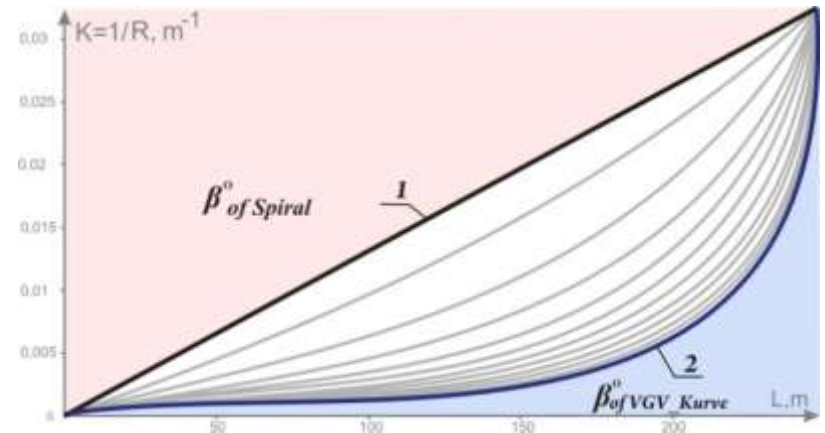
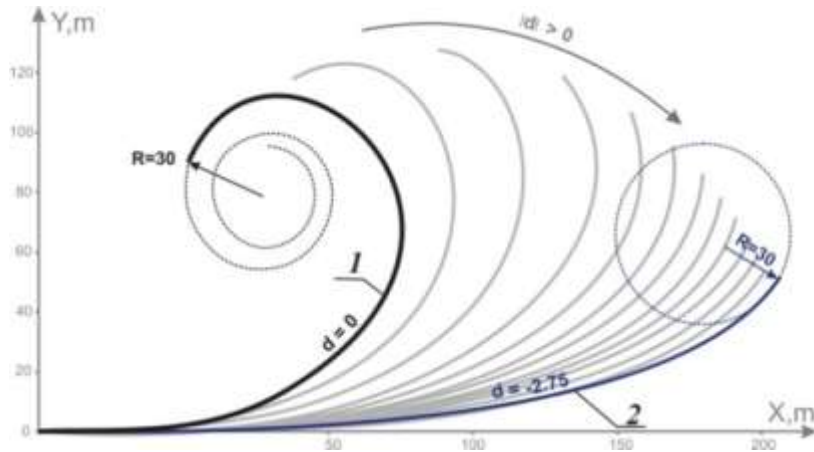
Где

$$J = \frac{(v_c + \sqrt{v_c^2 - 2dL}) \times \left(\sqrt{(v_c^2 k_c)^2 + d^2} - \sqrt{((v_c^2 - 2dL)k_0)^2 + d^2} \right)}{2L}$$

Геометрический потенциал VGV_Kurve



Частные случаи VGV_Kurve



Частный случай 1:

при $d=0$ VGV_Kurve превращается в клотоиду

$$k_l = k_0 + (k_c - k_0) \frac{l}{L}$$

Частный случай 2:

при $k_0 \neq 0$ и $J_{const} = 0$ VGV_Kurve приближает важное свойство составных циркульных кривых AASHTO:

$$k_c v_c^2 = k_0 v_0^2$$

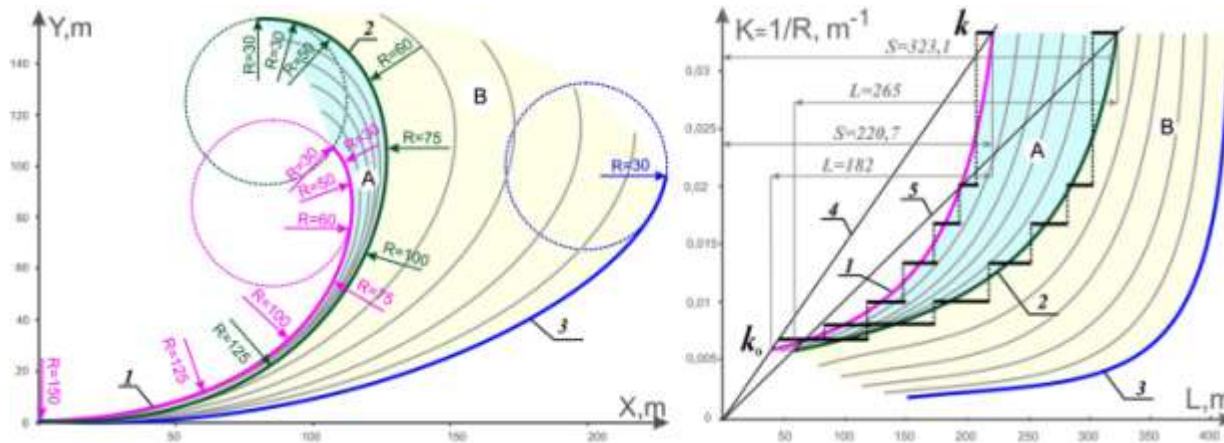
Подобие VGV_Kurve и коробовых кривых AASHTO

Упрощённые формулы VGV_Kurve при $k_0 \neq 0$ and $J_{const}=0$

$$k_l = \frac{Sk_0}{S-l}; \quad \beta = Sk_0 \ln \left(\frac{S}{S-l} \right)$$

Где

S = длина «базовой» спирали,
$$S = \frac{Lk_c}{k_c - k_0}$$



Принципы обеспечения безопасности криволинейного движения с переменной скоростью

Принцип 1: Длина переходной кривой должна быть достаточной для плавного и безопасного замедления

$$L \geq L_{Decel}$$

$$L_{Decel} \geq \frac{v_{c,85}^2 - v_{t,95}^2}{2d_n} \quad \text{или} \quad L_{Decel} \geq \frac{v_{c,85}^2 - v_{t,95}^2}{2d_n}$$

$$L_{Decel} = v_h t_n - 0.5 d_n (t_n)^2 + \frac{v_r^2 - (v_h + d_n t_n)^2}{2d_{wb}}$$

Где

L_{Decel} = Длина участка торможения, м;

v_h = Скорость движения по основной дороге, м/с;

v_r = Скорость входа на криволинейную часть ответвления, м/с;

t_n = Время снижения скорости двигателем, с;

d_n = Интенсивность снижения скорости двигателем, м/с²

d_{wb} = Интенсивность снижения скорости с применением тормозов, м/с²

Принципы обеспечения безопасности криволинейного движения с переменной скоростью

Принцип 2: Кривизна переходной кривой $k_l = f(k_0, k_c, L, v_c, d)$

должна быть рассчитана с учётом возможных превышений замедлений d_n или d_{wb}

где

d = расчётное замедление, определяющее закономерность кривизны переходной кривой

$$|d| \geq |d_n| \quad \text{или} \quad |d| \geq |d_{wb}|$$

Принципы обеспечения безопасности криволинейного движения с переменной скоростью

Принцип 3: Движение по переходной кривой с расчётными замедлениями d_n или d_{wb} не должно снижать допустимый уровень комфорта C_{max}

$$C \leq C_{max}$$

где

C = скорость нарастания центробежного ускорения при расчётных замедлениях d_n или d_{wb} , вычисляемая для VGV_Kurve по формуле

$$C = J \sqrt{1 + \left(\frac{d}{v_c^2 k_c} \right)^2} + 2v_c k_c (d_n - d)$$

Пример частичного соблюдения принципа при длине L , соизмеримой с клотоидой

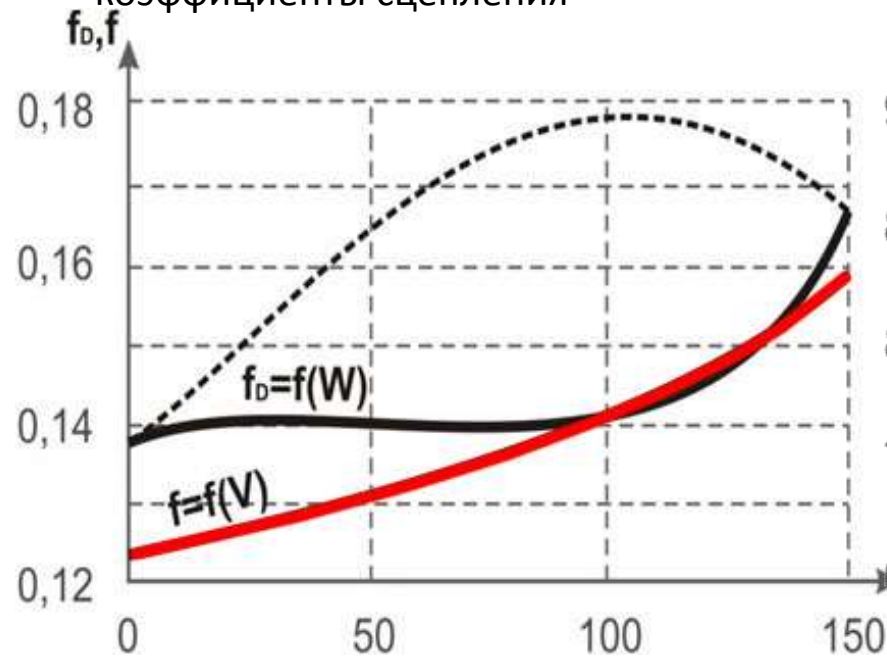
Данные для расчёта f_D :

$k_0=0 \text{ м}^{-1}$, $k_c=1/200 \text{ м}^{-1}$, $V_t=97 \text{ км/ч}$ (60 mph), $V_c=64 \text{ км/ч}$ (40 mph),

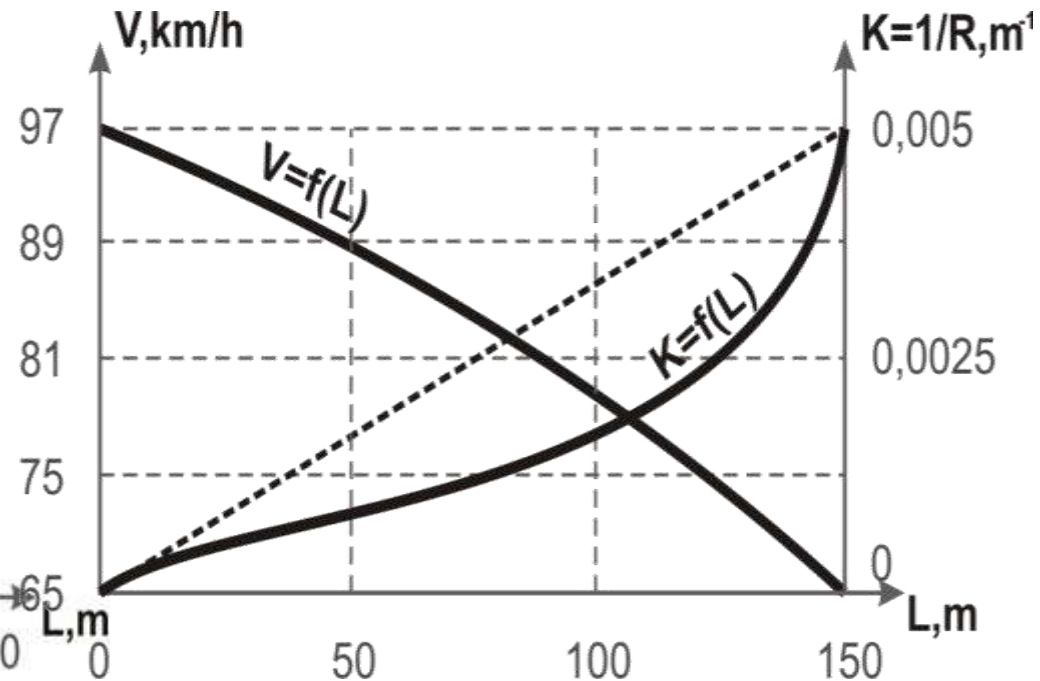
$i=-0,01$, $e_{min}=-0,025$, $e_{max}=0,06$,

$d_{wb}=-1,3 \text{ м/с}^2$, $d = -3,0 \text{ м/с}^2$, $L=150 \text{ м}$ ($\beta = 18^\circ 34' < 21^\circ 30'$), $C = 0,63 \text{ м/с}^3$

Требуемый (f_D) и предельный (f_{AASHTO}) коэффициенты сцепления



Переменная скорость и кривизна **VGV_Kurve** $L=150 \text{ м}$



Обеспечение безопасности движения по критерию $f_D < f$ при полном соблюдении принципов 1,2, и 3

Данные для расчёта f_D :

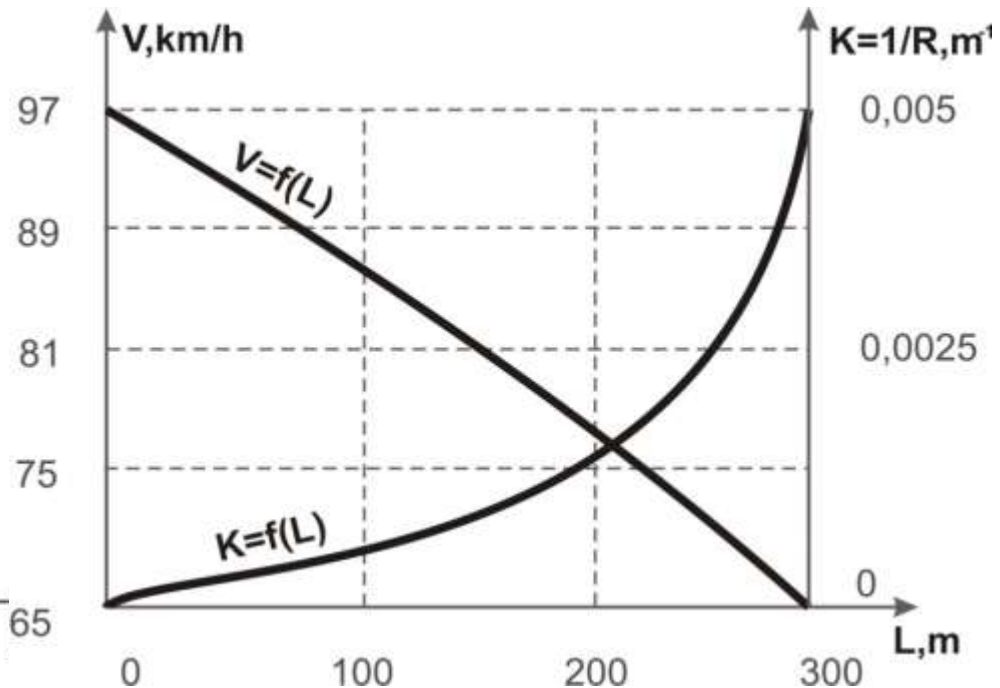
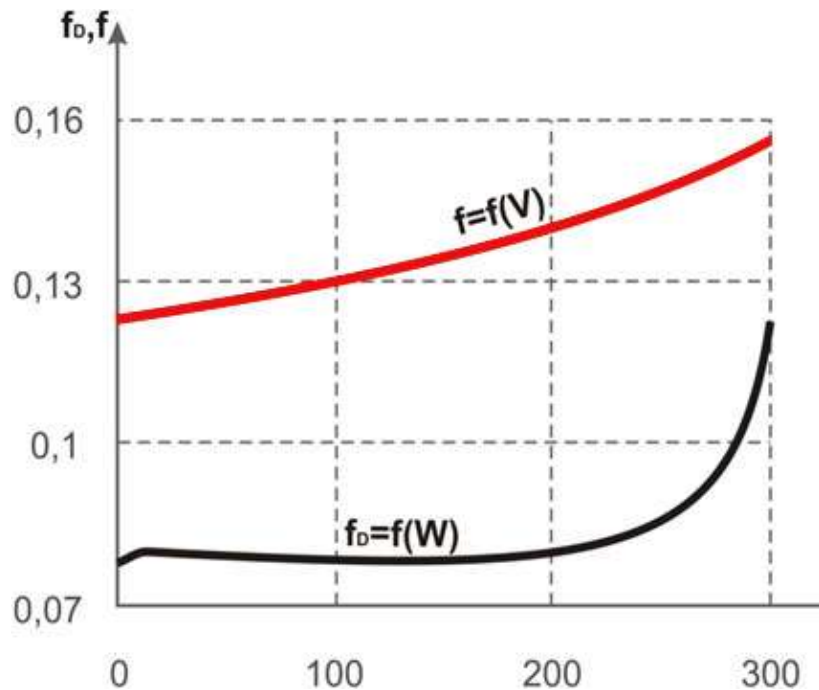
$k_0=0 \text{ м}^{-1}$, $k_c=1/200 \text{ м}^{-1}$, $V_t=97 \text{ км/ч}$ (60 mph), $V_c=64 \text{ км/ч}$ (40 mph),

$i=-0,01$, $e_{min}=-0,025$, $e_{max}=0,06$,

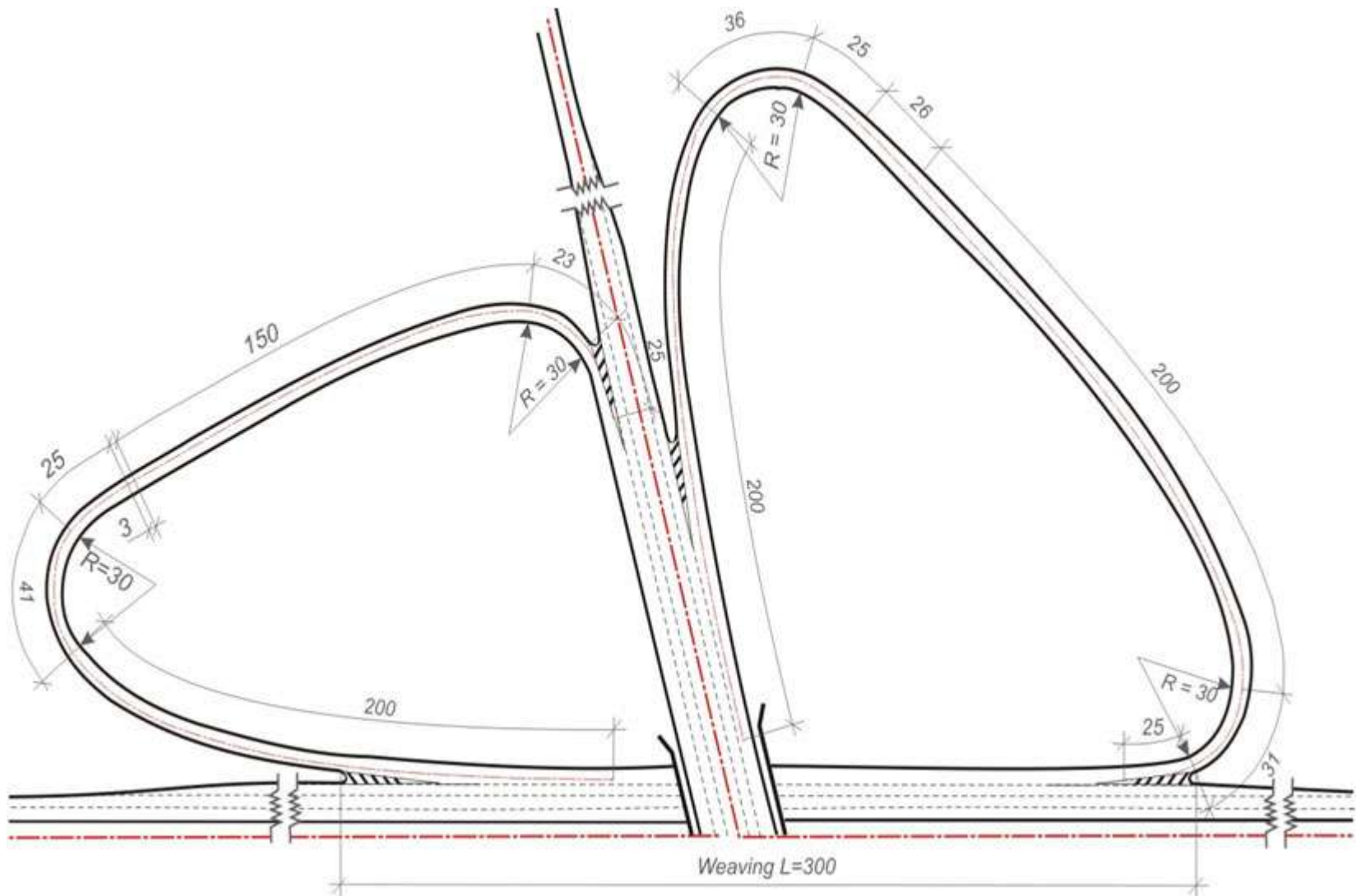
$d_{wb}=-0,7 \text{ м/с}^2$, $d = -3,0 \text{ м/с}^2$, $L=300 \text{ м}$ ($\beta = 20^\circ 34' < 21^\circ 30'$), $C = 0,5 \text{ м/с}^3$

Требуемый (f_D) и предельный (f_{AASHTO}) коэффициенты сцепления

Переменная скорость и кривизна **VGV_Kurve** $L=300 \text{ м}$

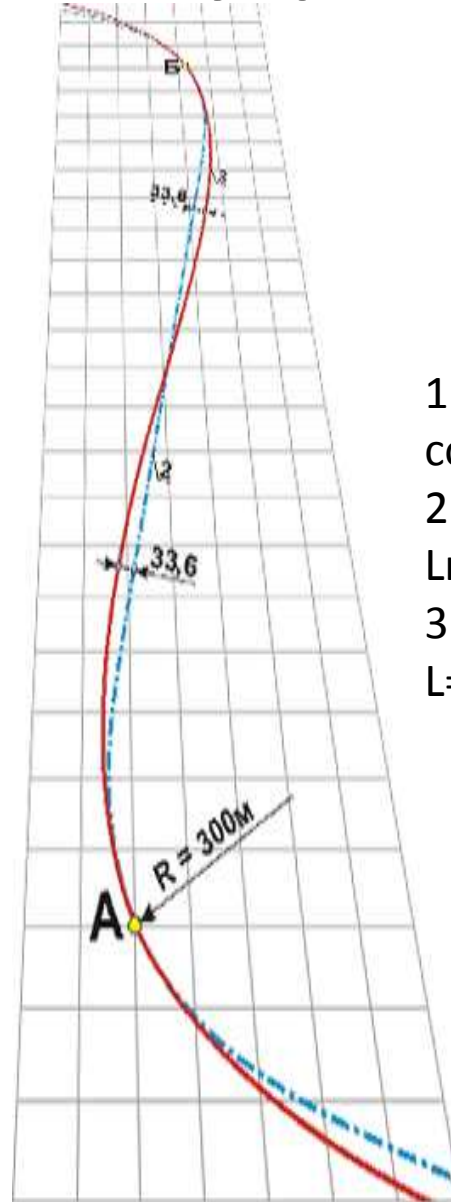
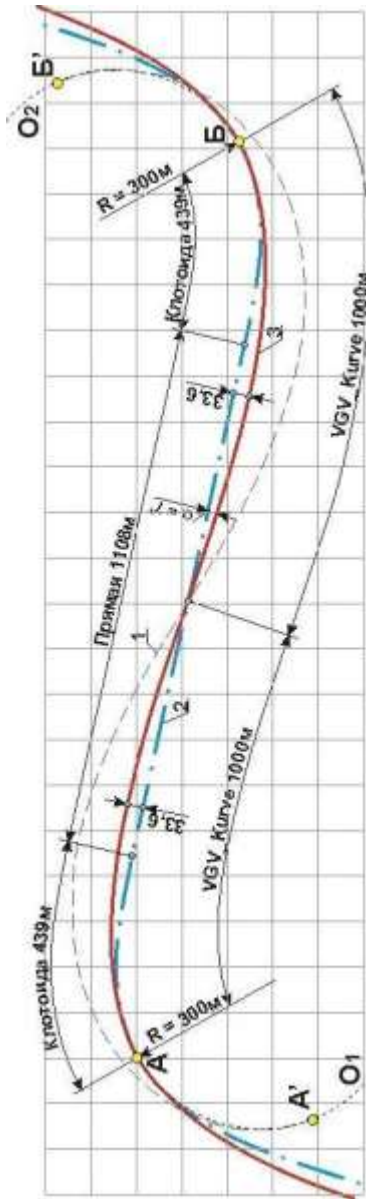


Пример проекта узла развязки «клеверный лист» с кривыми VGV_Kurve



Пример проекта криволинейного участка дороги

$L=2000$ m между кривыми $R=300$ m



1. Неосуществимое клотоидное сопряжение
2. Клотоидное сопряжение $L_{\max} 439$ m и прямой $L=1108$ m
3. Сопряжение VGK_Kurve $L=2 \times 1000$ m без прямой вставки

Выводы:

- Меры совершенствования геометрических свойств переходных кривых и новые правила их проектирования обладают значительным потенциалом повышения безопасности и удобства движения с переменной скоростью.
- Эти меры согласуются с мировыми тенденциями повышения безопасности криволинейных участков дорог
- Практической реализации этих тенденций способствует единство обоснованного математического и методологического обеспечения.

Безопасность криволинейного движения с переменной скоростью

Благодарю за внимание!



Главный конструктор
компании «Кредо-Диалог»
Величко Г.В.