DOI 10.15593/24111678/2017.04.04

УДК 656.11

О.С. Гасилова

Уральский государственный лесотехнический
университет, Екатеринбург, Россия

НАХОЖДЕНИЕ МИНИМАЛЬНО БЕЗОПАСНОГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ПРЯМОЛИНЕЙНО ДВИЖУЩИМИСЯ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ

Рассматривается движение транспортных средств в попутном направлении. При этом считается, что все стоящие транспортные средства, ожидающие включения зеленого сигнала светофора, не начинают движение одновременно, так как реальных условиях такое движение транспортных потоков не наблюдается. Для определения максимальной пропускной способности пересечений берется часть потока с постоянными характеристиками. Рассматривается такое понятие, как поток насыщения, которое остается одним из основных параметров транспортных потоков на регулируемых пересечениях в течение многих лет. Основной характеристикой потока насыщения необходимо считать минимально безопасное расстояние между движущимися транспортными средствами. При проведении автореализационных экспертиз необходимо найти остановочный путь транспортного средства (ТС), чтобы определить, была ли техническая возможность предотвратить дорожно-транспортное происшествие (ДТП). Для того чтобы исключить вероятность возникновения ДТП, необходимо, чтобы остановочный путь ТС был не менее минимально безопасного расстояния между автомобилями. Предложенные в статье методы определения минимально безопасного расстояния при попутном движении транспортных средств позволяют рассматривать все возможные случаи движения двух автомобилей при торможении, вплоть до полной остановки. Математическая модель движения транспортных средств на регулируемом пересечении даст возможность определить значения переменных величин, характеризующих движение ТС, диапазон их изменения, обеспечивающий безопасность дорожного движения. В настоящее время нет детерминированных математических моделей, определяющих безопасную дистанцию между автомобилями. Важно то, что предложенный в статье метод позволяет находить минимально безопасное расстояние между транспортными средствами в общем виде.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, дорожно-транспортное происшествие, математическая модель, регулируемое пересечение.

O.S. Gasilova

Ural State Forestry Engineering University,
Ekaterinburg, Russian Federation

FINDING OF MINIMUM SAFE DISTANCE BETWEEN RECTILINEARLY MOVING VEHICLES AT CONTROLLED INTERSECTIONS

In the paper movement of vehicles going in the same direction has been considered. It is deemed that all the standing vehicles expecting inclusion of a green signal don't begin the movement at the same time. In actual practice such movement of transport streams isn't observed. For the determination of the maximum capacity of crossings the part of a stream with constant characteristics has been analyzed. As a

result, the saturation flow concept which is remained one of key parameters of transport streams at controlled intersections for many years has been considered. It is necessary to consider minimum safe distance between moving vehicles as the main characteristic of saturation flow. When carrying out motor vehicles expertizes it is necessary to find a stopping way of a vehicle, in order to define whether there was a technical capability to prevent a road accident. To exclude the probability of initiation of a road accident it is necessary that the vehicle's stopping way was not less than minimum safe distance between vehicles. The methods of determination of minimum safe distance between rectilinearly moving vehicles presented in the paper allow considering all the cases of the movement of two cars when braking up to a full stop. A mathematical model of the traffic flow at a controlled intersection gives the opportunity to determine the values of the variables that define traffic flow as well as the range of its variation that ensures road safety. Currently, there is no determined mathematic model that defines safety distance per vehicle. It is very important that the method offered in the paper allows finding minimum safe distance in a general view.

Keywords: traffic safety, road traffic accident, mathematic model, controlled intersection.

Светофорное регулирование приводит к решению задачи, связанной с определением длительности горения зеленого сигнала по направлениям [1–5].

Предполагается, что ее решение обеспечивает максимальную пропускную способность пересечения. В реальности все стоящие транспортные средства при включении зеленого сигнала светофора не начинают движение одновременно [1–6]. При расчете длительности светофорного цикла исходят из предположения, что транспортные потоки движутся равномерно. В реальных условиях такое движение транспортных потоков не наблюдается. Особенно заметна неравномерность движения у первых трех-пяти транспортных средств, начинающих его на разрешающий сигнал светофора и заканчивающих движение в данном такте.

Такая неравномерность движущегося потока, конечно, была замечена авторами, которые занимались расчетами длительности светофорной сигнализации. Поскольку все расчеты строились на эмпирических наблюдениях, то для определения максимальной пропускной способности пересечений при моделировании дорожного движения была взята часть потока с постоянными характеристиками [7–10].

В результате было введено понятие «поток насыщения», которое остается одним из важных параметров транспортных потоков на регулируемых пересечениях в течение многих лет. Основной характеристикой потока насыщения, по мнению автора, необходимо считать минимально безопасное расстояние между движущимися транспортными средствами, определение которого дано в работе [11].

В настоящее время при проведении автотехнических экспертиз приходится отвечать на вопрос: была ли техническая возможность предотвратить дорожно-транспортное происшествие? При этом решается задача определения остановочного пути транспортного средства [12–15]. Для исключения дорожно-транспортного происшествия необходимо,

чтобы его остановочный путь был не менее минимально безопасного расстояния между транспортными средствами.

Рассмотрим нахождение минимально безопасного расстояния, на которое может приблизиться транспортное средство (ТС) A_2 , догоняющее ТС A_1 , при выполнении неравенств (рис. 1)

$$V_1^0 < V_2^0, \quad V_1^0 \leq \frac{j_1}{2}(T_1 - t_{13}), \quad V_2^0 \leq \frac{j_2}{2}(T_2 - t_{23}), \quad 0 < t_{13п} < t_{1ост}^{(1)} \leq t_{23} < t_{2ост}^{(1)},$$

где V_1^0 – скорость ТС A_1 ; V_2^0 – скорость ТС A_2 ; j_1 – замедление ТС A_1 ; j_2 – замедление ТС A_2 ; $t_{13п}$ – время запаздывания срабатывания тормозного привода ТС A_1 ; $t_{1ост}^{(1)}$ – время движения ТС A_1 до полной остановки при выполнении неравенства $V_1^0 \leq \frac{j_1}{2}(T_1 - t_{13})$; $t_{2ост}^{(1)}$ – время движения ТС A_2 до полной остановки при выполнении неравенства $V_2^0 \leq \frac{j_2}{2}(T_2 - t_{23})$; $t_{13} = t_{1п} + t_{13п}$, $t_{1п}$ – время реакции водителя ТС A_1 ; $T_1 = t_{13} + t_{1нз}$, $t_{1нз}$ – время нарастания замедления ТС A_1 ; $t_{23} = t_{2п} + t_{23п}$, $t_{2п}$ – время реакции водителя ТС A_2 , $t_{23п}$ – время запаздывания срабатывания тормозного привода ТС A_2 ; $T_2 = t_{23} + t_{2нз}$, $t_{2нз}$ – время нарастания замедления ТС A_2 .

Рис. 1. Зависимость замедления i -го автомобиля от времени начала обнаружения опасности до полной его остановки при экстренном торможении

В данной статье рассматривается задача нахождения минимально безопасного расстояния, на которое может приблизиться ТС A_2 к ТС A_1 . В случае применения водителем ТС A_1 экстренного торможения водитель ТС A_2 , включив экстренное торможение, может предотвратить столкновение транспортных средств. Будем считать, что скорости ТС A_1 и A_2 удовлетворяют неравенствам

$$V_1^0 < V_2^0, \quad V_1^0 \leq \frac{j_1}{2}(T_1 - t_{13}), \quad V_2^0 \leq \frac{j_2}{2}(T_2 - t_{23}). \quad (1)$$

В работе [11] рассматривается вопрос нахождения минимально безопасного расстояния для первой модели движения, т.е. когда замедление i -го автомобиля при экстренном торможении определяется равенством

$$a_i(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_{i3}; \\ -\frac{1}{2}j_i, & t_{i3} < t \leq T_i; \\ -j_i, & T_i < t \leq t_{i\text{ост}}^{(2)}; \\ 0, & t > t_{i\text{ост}}^{(2)}. \end{cases} \quad (i=1, 2).$$

В качестве законов изменения пути и скорости ТС при экстренном торможении будем рассматривать вторую модель. В этом случае закон изменения замедления i -го автомобиля имеет вид

$$a_i(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_{i3}; \\ -\alpha_i(t - t_{i3}), & t_{i3} < t \leq T_i; \\ -j_i, & T_i < t \leq t_{i\text{ост}}^{(2)}, \end{cases}$$

где $\alpha_i = \frac{j_i}{T_i - t_{i3}}$ ($i=1, 2$).

При выполнении неравенств (1) законы изменения пути и скорости имеют вид

$$V_i(t) = \begin{cases} V_i^0, & 0 \leq t \leq t_{i3}; \\ V_i^0 - \frac{\alpha_i}{2}t_{i3}^2 + \alpha_i t_{i3}t - \frac{\alpha_i}{2}t^2, & t_{i3} < t \leq t_{i\text{ост}}^{(2)}; \\ 0, & t \geq t_{i\text{ост}}^{(2)}. \end{cases} \quad (2)$$

$$S_i(t) = \begin{cases} V_i^0 t, & 0 \leq t \leq t_{i3}; \\ \frac{\alpha_i}{6}t_{i3}^3 + \left[V_i^0 - \frac{\alpha_i}{2}t_{i3}^2 \right] t + \frac{\alpha_i t_{i3}}{2}t^2 - \frac{\alpha_i}{6}t^3, & t_{i3} < t \leq t_{i\text{ост}}^{(2)}; \\ t_{i3}V_i^0 + \frac{2}{3}V_i^0 \sqrt{\frac{2V_i^0}{j_i}(T_i - t_{i3})}, & t \geq t_{i\text{ост}}^{(2)}. \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим прямолинейное поступательное движение ТС A_1 и A_2 , причем ТС A_2 движется сзади ТС A_1 . За начальный момент времени $t_0 = 0$ принимаем момент обнаружения водителем ТС A_2 момента начала торможения водителем ТС A_1 .

А. Пусть выполняются неравенства

$$0 < t_{13п} < t_{1ост}^{(1)} \leq t_{23} < t_{2ост}^{(1)}. \quad (4)$$

Из неравенств (4) следует, что автомобиль A_1 после начала торможения остановится раньше автомобиля A_2 .

Учитывая равенства (2), (3) и неравенства (4), запишем выражения функций $\Delta V(t) = V_1^0(t) - V_2^0(t)$ и $s(t) = \Delta S(t) - S^0$ на отрезке времени $[0, t_{2ост}^{(1)}]$.

$$\Delta V = \begin{cases} V_1^0 - V_2^0, & 0 \leq t \leq t_{13}; \\ (V_1^0 - V_2^0 - \frac{\alpha_1}{2} t_{13}^2) + \alpha_1 t_{13} t - \frac{\alpha_1}{2} t^2, & t_{13} < t \leq t_{1ост}^{(1)}; \\ -V_2^0, & t_{1ост}^{(1)} < t \leq t_{23}; \\ -V_2^0 + \frac{\alpha_2}{2} t_{23}^2 - \alpha_2 t_{23} t + \frac{\alpha_2}{2} t^2, & t_{23} < t \leq t_{2ост}^{(1)}; \end{cases} \quad (5)$$

$$s(t) = \begin{cases} (V_1^0 - V_2^0)t, & 0 \leq t \leq t_{13}; \\ \frac{\alpha_1}{6} t_{13}^3 + \left[(V_1^0 - V_2^0) - \frac{\alpha_1}{2} t_{13}^2 \right] t + \frac{\alpha_1 t_{13}}{2} t^2 - \frac{\alpha_1}{6} t^3, & t_{13} < t \leq t_{1ост}^{(1)}; \\ t_{13} V_1^0 + \frac{2}{3} V_1^0 \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} - V_2^0 t, & t_{1ост}^{(1)} < t \leq t_{23}; \\ t_{13} V_1^0 + \frac{2}{3} V_1^0 \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} - \frac{\alpha_2}{6} t_{23}^2 - \left[V_2^0 - \frac{\alpha_2}{2} t_{23}^2 \right] t - \frac{\alpha_2 t_{23}}{2} t^2 + \frac{\alpha_2}{6} t^3, & t_{23} < t \leq t_{2ост}^{(1)}. \end{cases} \quad (6)$$

На отрезке времени $[0, t_{13}]$ безопасных моментов касания нет. Функция $\Delta V(t) = V_1^0 - V_2^0 < 0$ принимает на этом отрезке времени отрицательные значения, а функция $s(t)$, принимая отрицательные значения, строго монотонно убывает. При $t = t_{13}$ выполняются неравенства

$$\begin{cases} \Delta V(t_{13}) < 0, \\ s(t_{13}) < 0. \end{cases}$$

На полуинтервале $(t_{13}, t_{\text{лост}}^{(1)})$ функция $\Delta V(t)$ имеет вид

$$\Delta V(t) = -\frac{\alpha_1}{2}t^2 + \alpha_1 t_{13}t + (V_1^0 - V_2^0 - \frac{\alpha_1}{2}t_{13}^2).$$

Моменты времени $t_{1, 2}$, подозрительные на безопасный момент касания на полуинтервале $(t_{13}, t_{\text{лост}}^{(1)})$, являются решениями уравнения

$$\frac{\alpha_1}{2}t^2 - \alpha_1 t_{13}t - (V_1^0 - V_2^0 - \frac{\alpha_1}{2}t_{13}^2) = 0. \quad (7)$$

Определим дискриминант уравнения (7)

$$D = \alpha_1^2 t_{13}^2 + 2\alpha_1(V_1^0 - V_2^0 - \frac{\alpha_1}{2}t_{13}^2) = 2\alpha_1(V_1^0 - V_2^0) < 0.$$

Отсюда следует, что уравнение (7) действительных корней не имеет, ветви параболы направлены вниз и, следовательно, $\Delta V(t) < 0$ для $\forall t \in (t_{13}, t_{\text{лост}}^{(1)})$. Функция $s(t)$, принимая отрицательные значения, строго монотонно убывает на полуинтервале $(t_{13}, t_{\text{лост}}^{(1)})$. При $t = t_{\text{лост}}^{(1)}$ выполняются неравенства

$$\begin{cases} \Delta V(t_{\text{лост}}^{(1)}) < 0, \\ s(t_{\text{лост}}^{(1)}) < 0. \end{cases} \quad (8)$$

A1. Пусть в неравенствах (4) выполняется строгое неравенство

$$t_{\text{лост}}^{(1)} < t_{23}. \quad (9)$$

На полуинтервале $(t_{\text{лост}}^{(1)}, t_{23})$ функция $\Delta V(t)$ имеет вид $\Delta V(t) = -V_2^0 < 0$ для $\forall t \in (t_{\text{лост}}^{(1)}, t_{23})$. Функция $s(t)$, принимая в силу неравенств (8) отрицательные значения, строго монотонно убывает на полуинтервале $(t_{\text{лост}}^{(1)}, t_{23})$. При $t = t_{23}$ выполняются неравенства

$$\begin{cases} \Delta V(t_{23}) < 0, \\ s(t_{23}) < 0. \end{cases}$$

На полуинтервале $\left(t_{23}, t_{2\text{ост}}^{(1)}\right]$ функция $\Delta V(t)$ имеет вид

$$\Delta V(t) = -V_2^0 + \frac{\alpha_2}{2} t_{23}^2 - \alpha_2 t_{23} t + \frac{\alpha_2}{2} t^2. \quad (10)$$

Моменты времени, подозрительные на безопасный момент касания, являются корнями уравнения

$$\Delta V(t) = -V_2^0 + \frac{\alpha_2}{2} t_{23}^2 - \alpha_2 t_{23} t + \frac{\alpha_2}{2} t^2 = 0. \quad (11)$$

Вычислим дискриминант данного уравнения:

$$D = \alpha_2^2 t_{23}^2 - 2\alpha_2 \left(-V_2^0 + \frac{\alpha_2}{2} t_{23}^2 \right) = 2\alpha_2 V_2^0 > 0.$$

Поскольку дискриминант уравнения (11) положителен, то уравнение имеет два действительных различных корня

$$t_{1,2} = \frac{\alpha_2 t_{23} \pm \sqrt{2\alpha_2 V_2^0}}{\alpha_2}.$$

Корень $t_1 = \frac{\alpha_2 t_{23} - \sqrt{2\alpha_2 V_2^0}}{\alpha_2} = t_{23} - \sqrt{\frac{2V_2^0}{\alpha_2}} < t_{23}$ посторонний, так как $t_1 \notin \left(t_{23}, t_{2\text{ост}}^{(1)}\right]$.

Из равенства $t_2 = \frac{\alpha_2 t_{23} + \sqrt{2\alpha_2 V_2^0}}{\alpha_2} = t_{23} + \sqrt{\frac{2V_2^0}{\alpha_2}} = t_{2\text{ост}}^{(1)}$ следует, что корень t_2 является безопасным моментом касания на полуинтервале $\left(t_{23}, t_{2\text{ост}}^{(1)}\right]$.

В связи с тем что коэффициент при t^2 в выражении (11) положителен, ветви параболы направлены вверх, и, следовательно, при $\forall t \in (t_1, t_2)$ функция $\Delta V(t)$ принимает отрицательные значения. Из этого следует, что функция $s(t)$ на интервале $\forall t \in (t_{23}, t_{2\text{ост}}^{(1)}) \subset (t_1, t_2 = t_{2\text{ост}}^{(1)})$ принимает отрицательные значения и строго монотонно убывает. При $t = t_{2\text{ост}}^{(1)}$ выполняются неравенства

$$\begin{cases} \Delta V(t_{2\text{ост}}^{(1)}) = 0, \\ s(t_{2\text{ост}}^{(1)}) < 0. \end{cases}$$

Таким образом, получим, что при выполнении условий (4) и неравенств (9) функция $s(t)$, принимая отрицательные значения, строго монотонно убывает на отрезке $[0, t_{2\text{ост}}^{(1)}]$ и достигает отрицательного наименьшего значения при $t = t_{2\text{ост}}^{(1)}$.

Минимально безопасное расстояние в этом случае определяется равенством

$$S_{\min}^0 = (V_2^0 t_{23} - V_1^0 t_{13}) + \frac{2}{3} \left[V_2^0 \sqrt{\frac{2V_2^0}{\alpha_2}} - V_1^0 \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} \right],$$

или с учетом равенств

$$\alpha_1 = \frac{j_1}{T_1 - t_{13}}, \quad \alpha_2 = \frac{j_2}{T_2 - t_{23}}$$

имеем

$$S_{\min}^0 = (V_2^0 t_{23} - V_1^0 t_{13}) + \frac{2}{3} \left[V_2^0 \sqrt{\frac{2V_2^0}{j_2} (T_2 - t_{23})} - V_1^0 \sqrt{\frac{2V_1^0}{j_1} (T_1 - t_{13})} \right].$$

Графики функций $\Delta V(t)$ и $s(t)$ изображены на рис. 2.

Рис. 2. Графики функций $\Delta V(t)$ и $s(t)$

A2. Пусть в неравенствах (4) выполняется равенство

$$t_{\text{locr}}^{(1)} = t_{23}. \quad (12)$$

В этом случае равенства (5), (6) имеют вид

$$\Delta V = \begin{cases} V_1^0 - V_2^0, & 0 \leq t \leq t_{13}; \\ (V_1^0 - V_2^0 - \frac{\alpha_1}{2} t_{13}^2) + \alpha_1 t_{13} t - \frac{\alpha_1}{2} t^2, & t_{13} < t \leq t_{\text{locr}}^{(1)} = t_{23}; \\ -V_2^0 + \frac{\alpha_2}{2} t_{23}^2 - \alpha_2 t_{23} t + \frac{\alpha_2}{2} t^2, & t_{23} < t \leq t_{2\text{ocr}}^{(1)}; \end{cases} \quad (13)$$

$$s(t) = \begin{cases} (V_1^0 - V_2^0)t, & 0 \leq t \leq t_{13}; \\ \frac{\alpha_1}{6} t_{13}^3 + \left[(V_1^0 - V_2^0) - \frac{\alpha_1}{2} t_{13}^2 \right] t + \frac{\alpha_1 t_{13}}{2} t^2 - \frac{\alpha_1}{6} t^3, & t_{13} < t \leq t_{\text{locr}}^{(1)} = t_{23}; \\ t_{13} V_1^0 + \frac{2}{3} V_1^0 \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} - \frac{\alpha_2}{6} t_{23}^2 - \left[V_2^0 - \frac{\alpha_2}{2} t_{23}^2 \right] t - \frac{\alpha_2 t_{23}}{2} t^2 + \frac{\alpha_2}{6} t^3, & t_{23} < t \leq t_{2\text{ocr}}^{(1)}. \end{cases} \quad (14)$$

В этом случае полуинтервал $t_{\text{locr}}^{(1)} < t \leq t_{23}$ в выражениях функций $\Delta V(t)$ и $s(t)$ отсутствует.

Проверим, сохранилась ли непрерывность функции $\Delta V(t)$ в точке $t = t_{\text{locr}}^{(1)} = t_{23}$. Рассмотрим разность

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow t_{23}^-} \Delta V(t) - \lim_{t \rightarrow t_{23}^+} \Delta V(t) &= \left(V_1^0 - V_2^0 - \frac{\alpha_1}{2} t_{13}^2 \right) + \alpha_1 t_{13} \left(t_{13} + \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} \right) - \\ &- \frac{\alpha_1}{2} \left(t_{13} + \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} \right)^2 - V_2^0 - \frac{\alpha_2}{2} \left(t_{13} + \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} \right)^2 + \alpha_2 \left(t_{13} + \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} \right) - \\ &- \frac{\alpha_2}{2} \left(t_{13} + \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} \right)^2 = V_1^0 - \frac{\alpha_1}{2} t_{13}^2 + \alpha_1 t_{13}^2 + \alpha_1 t_{13} \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} - \frac{\alpha_1}{2} t_{13}^2 - \\ &- \alpha_1 t_{13} \sqrt{\frac{2V_1^0}{\alpha_1}} - \frac{\alpha_1}{2} \cdot \frac{2V_1^0}{\alpha_1} = 0. \end{aligned}$$

Из последнего равенства следует непрерывность функции $\Delta V(t)$ в точке $t = t_{\text{locr}}^{(1)} = t_{23}$. Поскольку функция $\Delta V(t)$ в точке $t = t_{\text{locr}}^{(1)} = t_{23}$

непрерывна, то функция $s(t)$ также непрерывна в этой точке. Как и в случае A1, на отрезке времени $[0, t_{13}]$ безопасных моментов касания нет. Функция

$$\Delta V(t) < 0.$$

Для $\forall t \in [0, t_{13}]$ функция $s(t)$, принимая отрицательные значения, строго монотонно убывает. При $t = t_{13}$ выполняются неравенства

$$\begin{cases} \Delta V(t_{13}) < 0, \\ s(t_{13}) < 0. \end{cases}$$

На полуинтервале $(t_{13}, t_{1\text{ост}}^{(1)} = t_{23}]$ функция $\Delta V(t)$ удовлетворяет неравенству $\Delta V(t) < 0 \quad \forall t \in (t_{13}, t_{1\text{ост}}^{(1)} = t_{23}]$. Поскольку дискриминант уравнения (7) $D = 2\alpha_1(V_1^0 - V_2^0) < 0$, данное уравнение действительных корней не имеет, а так как коэффициент при t^2 в выражении функции $\Delta V(t)$ отрицательный, то ветви параболы направлены вниз.

Следовательно, функция $s(t)$, принимая отрицательные значения, строго монотонно убывает на полуинтервале $(t_{13}, t_{1\text{ост}}^{(1)} = t_{23}]$. При $t = t_{1\text{ост}}^{(1)} = t_{23}$ выполняются неравенства

$$\begin{cases} \Delta V(t_{1\text{ост}}^{(1)} = t_{23}) < 0, \\ s(t_{1\text{ост}}^{(1)} = t_{23}) < 0. \end{cases} \quad (15)$$

На полуинтервале $(t_{1\text{ост}}^{(1)} = t_{23}, t_{2\text{ост}}^{(1)}]$ функция $\Delta V(t)$ имеет вид $\Delta V(t) = -V_2^0 + \frac{\alpha_2}{2}t_{23}^2 - \alpha_2 t_{23}t + \frac{\alpha_2}{2}t^2$. Моменты времени, подозрительные на безопасный момент касания, являются корнями уравнения (11). Дискриминант уравнения (11) $D = 2\alpha_2 V_2^0 > 0$.

В связи с тем что дискриминант уравнения $\Delta V(t) = -V_2^0 + \frac{\alpha_2}{2}t_{23}^2 - \alpha_2 t_{23}t + \frac{\alpha_2}{2}t^2 = 0$ положителен, уравнение имеет два действительных различных корня t_1, t_2 . Корень $t_2 = t_{2\text{ост}}^{(1)}$ является безопасным моментом касания на полуинтервале $(t_{23}, t_{2\text{ост}}^{(1)}]$.

Поскольку коэффициент при t^2 в выражении (10) положителен, ветви параболы направлены вверх, и, следовательно, при $\forall t \in (t_1, t_2)$ функция $\Delta V(t)$ принимает отрицательные значения, а так как $t_1 < t_{23}$, то $\forall t \in (t_{23}, t_{2\text{ост}}^{(1)}) \subset (t_1, t_2 = t_{2\text{ост}}^{(1)})$. Из этого следует, что функция $s(t)$ на интервале $\forall t \in (t_{23}, t_{2\text{ост}}^{(1)}) \subset (t_1, t_2 = t_{2\text{ост}}^{(1)})$ принимает отрицательные значения и строго монотонно убывает. При $t = t_{2\text{ост}}^{(1)}$ выполняются неравенства

$$\begin{cases} \Delta V(t_{2\text{ост}}^{(1)}) = 0, \\ s(t_{2\text{ост}}^{(1)}) < 0. \end{cases}$$

Таким образом, получим, что при выполнении условий (1) и равенства (12) функция $s(t)$, принимая отрицательные значения, строго монотонно убывает на отрезке $[0, t_{2\text{ост}}^{(1)}]$ и достигает отрицательного наименьшего значения при $t = t_{2\text{ост}}^{(1)}$.

Минимально безопасное расстояние в этом случае определяется равенством

$$S_{\min}^0 = (V_2^0 - V_1^0)t_{23} + \frac{2}{3}V_2^0 \sqrt{\frac{2V_2^0}{\alpha_2}}.$$

Графики функций $\Delta V(t)$ и $s(t)$ изображены на рис. 3.

Рис. 3. Графики функций $\Delta V(t)$ и $s(t)$

Таким образом, полученные формулы определения минимально безопасного расстояния, когда выполняются неравенства (1), позволяют находить дистанцию между автомобилями, которые движутся с небольшими скоростями, так как величины времени нарастания замедления $t_{1нз}$, $t_{2нз}$ могут быть малыми. Однако в случае, если перед торможением автомобиля двигались по мокрому участку дороги и вода попала между тормозными колодками и диском или барабаном, время нарастания замедления для каждого автомобиля может возрасти в десятки раз.

Список литературы

1. Организация дорожного движения / И.Н. Пугачев, А.Э. Горев, А.И. Солодкий, А.В. Белов. – М.: Академия, 2013. – 240 с.
2. Левашев А.Г., Михайлов А.Ю., Головных И.М. Проектирование регулируемых пересечений: учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 208 с.
3. Highway capacity manual 2000 / Transportation Research Board, National Research Council. – Washington, D.C., USA, 2000. – 1134 p.
4. Branston D. Some factors affecting the capacity of signalized intersection // Traffic Eng. and Contr. – 1979. – Vol. 20, № 8-9. – P. 390–396.
5. Зырянов В.В., Кочерга В.Г., Феофилова А.А. Применение моделей выбора маршрута движения при прогнозировании распределения транспортных потоков на проектируемой дорожной сети // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог: сб. науч. тр. / ОАО «ГИПРОДОРНИИ». – Ростов н/Д, 2013. – № 4. – С. 33–40.
6. Натурные исследования перестроений транспортных средств на улично-дорожной сети / О.В. Алексеева, О.С. Гасилова, Е.А. Ивачев, М.О. Лыжина // Организация и безопасность дорожного движения: материалы X Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию со дня рождения д.т.н., проф. Л.Г. Резника / Тюмен. индустр. ун-т. – Тюмень, 2017. – Т. 2. – С. 139–142.
7. Повышение безопасности движения автомобилей на основе анализа аварийности и моделирования ДТП / В.А. Корчагин, С.А. Ляпин, В.Э. Клявин, В.В. Ситников // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6-2. – С. 251–256.
8. Захаров Д.А., Чистяков А.Н. Особенности функционирования транспортного комплекса города Тюмени // Нефть и газ Западной Сибири: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 90-летию со дня

рождения А.Н. Косухина / Тюмен. гос. нефтегаз. ун-т. – Тюмень, 2015. – Т. 3. – С. 170–174.

9. Гасилова О.С., Сидоров Б.А., Чернышев О.Н. Влияние на безопасность дорожного движения конфигурации перекрестков [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 94. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6980> (дата обращения: 19.09.2017).

10. Безопасность участников дорожного движения в конфликтных зонах транспортных систем: монография / Н.О. Вербицкая, О.В. Алексеева, А.А. Волков, О.С. Гасилова, Н.Б. Карев, А.Б. Сидоров, О.Б. Щетникова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. лесотехн. ун-та, 2016. – Ч. 1. – 265 с.

11. Карев Б.Н., Сидоров Б.А., Недоростов П.М. Методы расчета безопасных расстояний при попутном движении транспортных средств: монография. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. лесотехн. ун-та, 2005. – 315 с.

12. Васильев В.И., Овсянников В.Е., Войтеховская Е.А. Исследование процесса растормаживания автомобиля с целью разработки метода углубленного диагностирования тормозной системы [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 3. – URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2014/2467> (дата обращения: 19.09.2017).

13. Евтюков С.А., Тюлькин Е.В. Сравнение методов определения скорости движения транспортных средств при экспертизе ДТП // Автотранспортное предприятие. – 2015. – № 4. – С. 16–19.

14. Суворов Ю.Б., Чава И.И. Экспертная оценка действий участников дорожного движения и иных лиц, ответственных за обеспечение его безопасности. – М.: РФЦСЭ при Минюсте России, 2008. – 142 с.

15. Иларионов В.А. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий. – М.: Транспорт, 1989. – 255 с.

References

1. Pugachev I.N., Gorev A.Je., Solodkij A.I., Belov A.V. Organizacija dorozhnogo dvizhenija [Traffic organization]. Moscow, Academy, 2013, 240 p.

2. Levashev A.G. Mihajlov A.Ju. Golovnyh I.M. Proektirovanie reguliruemyh peresechenij [Design of controlled intersections]. Irkutsk, Irkutsk State Engineering University, 2007, 208 p.

3. Highway Capacity Manual 2000. Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., USA, 2000, 1134 p.

4. Branston D. Some factors affecting the capacity of signalized intersection. *Traffic Eng. and Contr.*, 1979, vol. 20, no. 8-9, pp. 390 – 396.

5. Zyrjanov V.V., Kocherga V.G., Feofilova A.A. Primenenie modelej vybora marshruta dvizhenija pri prognozirovanii raspredelenija transportnyh potokov na proektiruemoj dorozhnoj seti [The application of models of route choice traffic forecasts of the distribution of traffic on the designed road network]. *Aktual'nye voprosy proektirovanija avtomobil'nyh dorog. Sbornik nauchnyh trudov OAO «GIPRODORNII»*. Rostov-na-Donu, 2013, no. 4, pp. 33-40.

6. Alekseeva O.V., Gasilova O.S., Ivachev E.A., Lyzhina M.O. Naturnye issledovanija perestroenij transportnyh sredstv na ulichno-dorozhnoj seti [Field studies of the transposition of vehicles on the road network]. *Organizacija i bezopasnost' dorozhnogo dvizhenija. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*. Tyumen, Tyumen Industrial University, 2017, vol.2, pp. 139-142.

7. Korchagin V.A., Ljapin S.A., Kljavin V.Je., Sitnikov V.V. Povyshenie bezopasnosti dvizhenija avtomobilej na osnove analiza avarijnosti i modelirovanija DTP [Improving the safety of movement of vehicles on the basis of the analysis of accidents and modelling of road accident]. *Fundamental'nye issledovanija*, 2015, no. 6-2, pp. 251-256.

8. Zaharov D.A., Chistjakov A.N. Osobennosti funkcionirovanija transportnogo kompleksa goroda Tjumeni [Features of functioning of a transport complex of the city of Tyumen]. *Neft' i gaz Zapadnoj Sibiri. Proceedings International Scientific and Practical Conference*. Tyumen, The Tyumen State Oil-Gas University, 2015, vol. 3, pp. 170-174.

9. Gasilova O.S., Sidorov B.A., Chernyshev O.N. Vlijanie na bezopasnost' dorozhnogo dvizhenija konfiguracii perekrestkov [Impact on road safety the configuration of the intersections]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*, 2012, no. 5, p. 94, available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6980> (accessed 19 September 2017).

10. Verbickaja N.O., Alekseeva O.V., Volkov A.A., Gasilova O.S., Karev N.B., Sidorov A.B., Shhetnikova O.B. Bezopasnost' uchastnikov dorozhnogo dvizhenija v konfliktnyh zonah transportnyh system [The safety of road users in the conflict zones of transport systems]. Part.1. Ekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University, 2016, 265 p.

11. Karev B.N., Sidorov B.A., Nedorostov P.M. Metody rascheta bezopasnyh rasstoyanij pri poputnom dvizhenii transportnyh sredstv [Methods for calculating safe distances with the passing motion of vehicles]. Ekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University, 2005, 315 p.

12. Vasil'ev V.I., Ovsjannikov V.E., Vojtehovskaja E.A. Issledovanie processa rastormazhivaniya avtomobilja s cel'ju razrabotki metoda uglublennogo diagnostirovaniya tormoznoj sistemy [Research of process of a disinhibition of the car with the aim of developing a method of in-depth diagnosis of the braking system]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2014, no. 3, available at <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2467> (accessed 19 September 2017).

13. Evtjukov S.A., Tjul'kin E.V. Sravnenie metodov opredelenija skorosti dvizhenija transportnyh sredstv pri jekspertize DTP [Comparison of methods of determining the velocity of the vehicles in the examination of accident]. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2015, no. 4, pp. 16-19.

14. Suvorov YU.B., CHava I.I. EHkspertnaya ocenka dejstvij uchastnikov dorozhnogo dvizheniya i inyh lic, otvetstvennyh za obespechenie ego bezopasnosti [Expert evaluation of the actions of road users and other persons responsible for ensuring its safety]. Moscow, Russian Federal Center for Forensic Science, 2008, 142 p.

15. Ilarionov V.A. EHkspertiza dorozhno-transportnyh proisshestvij [Examination of road accidents]. Moscow, Transport, 1989, 255 p.

Получено 16.10.2017

Об авторе

Гасилова Ольга Сергеевна (Екатеринбург, Россия) – аспирант кафедры «Автомобильный транспорт», Институт автомобильного транспорта и технологических систем Уральского государственного лесотехнического университета (620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 33а/1, e-mail: gasilovaolga1983@gmail.com).

About the author

Ol'ga S. Gasilova (Ekaterinburg, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Automobile Transport, Institute Automobile Transport and Technological Systems, Ural State Forest Engineering University (33a/1, Sibirsky trakt, Ekaterinburg, 620100, Russian Federation, e-mail: gasilovaolga1983@gmail.com).