

Оценка безопасности движения транспортных средств на прямолинейном участке дороги

Н.А. Филатова, И.А. Ласточкин, Б.Н. Карев, Б.А. Сидоров

Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург

Аннотация: В статье рассматривается безопасность движения транспортных средств на прямолинейном участке дороги. Оценивается возможность возникновения дорожно-транспортного происшествия при внезапном торможении впереди идущего автомобиля по какой-либо причине. Для обеспечения безопасности движения и предотвращения снижения пропускной способности дороги из-за возникновения дорожно-транспортного происшествия транспортные средства, движущиеся по прямолинейному участку дороги большой протяженности должны соблюдать расстояние, определенное по формулам.

Ключевые слова: пропускная способность дороги, дорожно-транспортное происшествие, безопасность движения, минимально-безопасное расстояние.

Транспортные средства, как правило, развивают наибольшую скорость на прямолинейном участке дороги большой протяженности [5-7]. При этом увеличивается опасность возникновения дорожно-транспортного происшествия и, как следствие, уменьшение пропускной способности дороги на какой-то промежуток времени [8-10].

Оценим возможность возникновения дорожно-транспортного происшествия при внезапном торможении впереди идущего автомобиля по какой-либо причине.

Рассмотрим следующую дорожную ситуацию при движении автомобилей A_1 и A_2 в попутном направлении: автомобиль A_2 , имеющий скорость V_2^0 , догоняет впереди движущийся со скоростью V_1^0 автомобиль A_1 , т.е. выполняется неравенство

$$V_2^0 > V_1^0. \quad (1)$$

Постановка задачи. На каком минимально-безопасном расстоянии S_{\min}^0 должен находиться автомобиль A_2 от автомобиля A_1 , чтобы в случае применения экстренного торможения водителем автомобиля A_1 водитель автомобиля A_2 мог предотвратить столкновение.

Результат решения поставленной задачи приводится в [1, 3], однако при каких условиях им можно пользоваться не указано.

За начальный момент времени $t_0 = 0$ принимаем момент обнаружения водителем автомобиля A_2 момента начала торможения водителем автомобиля A_1 . Считаем, что автомобили A_1 и A_2 в начальный момент времени имели скорости V_1^0 и V_2^0 соответственно, причем скорости удовлетворяют неравенству (1).

При выполнении неравенств

$$V_1^0 > \frac{j_1}{2}(T_1 - t_{1zn}), \quad (2)$$

$$V_2^0 > \frac{j_2}{2}(T_2 - t_{2z}). \quad (3)$$

Законы изменения скорости движения и длины пути пройденного автомобилями A_1 и A_2 определены в [2]. Время движения автомобиля A_1 до полной остановки определяется равенством

$$t_{1ocm}^{(2)} = \frac{1}{j_1} \left[V_1^0 + \frac{j_1}{2}(T_1 + t_{1zn}) \right]. \quad (4)$$

Время движения автомобиля A_2 до полной остановки определяется равенством

$$t_{2ocm}^{(2)} = \frac{1}{j_2} \left[V_2^0 + \frac{j_2}{2}(T_2 + t_{2z}) \right]. \quad (5)$$

Отметим, что в рассматриваемом случае оба автомобиля оставят на дороге тормозной след всех своих колес, если тормозная система автомобилей исправна.

С) Пусть выполняются неравенства

$$0 < t_{1zn} < t_{2z} < T_2 < t_{1ocm}^{(1)} \leq t_{2ocm}^{(2)}. \quad (6)$$

Выражения функций $\Delta V(t)$ и $s(t)$ определены в [4].

Рассмотрим несколько случаев.

С 1) Пусть выполняется неравенство $j_2 - j_1 > 0$.

На полуинтервале $(t_{23}, T_2]$ функция $\Delta V(t)$ имеет вид

$$\Delta V(t) = \frac{j_2 - j_1}{2} t + \left[\Delta V^0 + \frac{1}{2} (j_1 t_{13n} - j_2 t_{23}) \right]$$

Моментом времени, подозрительным на безопасный момент касания, на полуинтервале $(t_{23}, T_2]$ будет точка t_3 , определенная равенством

$$t_3 = -\frac{1}{j_2 - j_1} \left[2\Delta V^0 + (j_1 t_{13n} - j_2 t_{23}) \right].$$

Теперь рассмотрим разность

$$t_3 - T_2 = -\frac{1}{j_2 - j_1} \left[2\Delta V^0 + j_1 (t_{13n} - T_2) - j_2 (t_{23} - T_2) \right]. \quad (7)$$

С 1.1) Пусть выполняется неравенство

$$2\Delta V^0 + j_1 (t_{13n} - T_2) - j_2 (t_{23} - T_2) > 0. \quad (8)$$

Тогда разность (7) меньше нуля, следовательно, выполняется неравенство

$$t_3 < T_2, \quad (9)$$

Из неравенства (9) следует, что $t_3 \in (t_{23}, T_2) \subset (t_{23}, T_2]$. Так как коэффициент при t в выражении функции $\Delta V(t)$ на полуинтервале $(t_{23}, T_2]$ положительный в силу $t_3 \in (t_{23}, T_2) \subset (t_{23}, T_2]$, то функция $\Delta V(t)$ принимает на сегменте (t_{23}, t_3) отрицательные значения, а на полуинтервале $(t_3, T_2]$ положительные значения. Следовательно, при $t = T_2$ выполняется неравенство

$$\Delta V(T_2) > 0. \quad (10)$$

Рассмотрим полуинтервал $(T_2, t_{1ocm}^{(1)}]$. Функция $\Delta V(t)$ на этом полуинтервале имеет вид

$$\Delta V(t) = \frac{2j_2 - j_1}{2} t + \left\{ \Delta V^0 + \frac{1}{2} [j_1 t_{13n} - j_2 (T_2 + t_{23})] \right\}, \quad (11)$$

а момент времени t_4 подозрительный на безопасный момент касания определяется равенством

$$t_4 = -\frac{2}{2j_2 - j_1} \left\{ \Delta V^0 + \frac{1}{2} [j_1 t_{13n} - j_2 (T_2 + t_{23})] \right\}. \quad (12)$$

Отметим, выполнение неравенства

$$2j_2 - j_1 > 0. \quad (13)$$

Проверим, принадлежит ли момент времени $t = t_4$ полуинтервалу $(T_2, t_{1ocm}^{(1)})$. Для этого рассмотрим сначала разность

$$t_4 - T_2 = -\frac{1}{2j_2 - j_1} \left\{ 2\Delta V^0 + j_1 (t_{13n} - T_2) - j_2 (t_{23} - T_2) \right\} < 0$$

в силу неравенств (8) и (13). Следовательно, выполняется неравенство

$$t_4 < T_2. \quad (14)$$

Отсюда следует, что $t_4 \notin (T_2, t_{1ocm}^{(1)})$. Так как коэффициент при t в выражении функции $\Delta V(t)$ на полуинтервале $(T_2, t_{1ocm}^{(1)})$ положительный в силу неравенства (13) и выполняется неравенство (14), то функция $\Delta V(t)$ принимает на полуинтервале $(T_2, t_{1ocm}^{(1)})$ положительные значения. Следовательно, при $t = t_{1ocm}^{(1)}$ выполняется неравенство

$$\Delta V(t_{1ocm}^{(1)}) > 0. \quad (15)$$

С 1.1.1) Пусть в неравенствах (6) выполняется строгое неравенство

$$t_{1ocm}^{(1)} < t_{2ocm}^{(2)}. \quad (16)$$

Очевидно, что функция $\Delta V(t)$ на полуинтервале $(t_{1ocm}^{(1)}, t_{2ocm}^{(2)})$ принимает отрицательные значения. Но тогда $\lim_{t \rightarrow t_{1ocm}^{(1)+0} } \Delta V(t) = \Delta V(t_{1ocm}^{(1)}) < 0$, что противоречит неравенству (15). Полученное противоречие показывает, что при выполнении неравенств (6), (16) неравенство (8) выполняться не может.

С 1.1.2) Пусть в условиях (6) выполняется равенство

$$t_{locm}^{(1)} = t_{2ocm}^{(2)}. \quad (17)$$

Равенство (17) может быть записано в виде

$$2(j_2V_1^0 - j_1V_2^0) + j_1j_2[(t_{13n} - t_{23}) + (t_{13n} - T_2)] + 2j_2V_1^0 = 0.$$

Но тогда будет выполняться равенство $\Delta V(t_{locm}^{(1)} = t_{2ocm}^{(2)}) = 0$, которое противоречит неравенству (15). Полученное противоречие показывает, что при выполнении неравенств (6) и равенства (17) неравенство (8) выполняться не может.

С 1.2) Пусть выполняется равенство

$$2\Delta V^0 + j_1(t_{13n} - T_2) - j_2(t_{23} - T_2) = 0. \quad (18)$$

Тогда разность (7) равна нулю, следовательно, выполняется равенство $t_3 = T_2$, что означает $t_3 \in (t_{23}, T_2]$. Так как коэффициент при t в выражении функции $\Delta V(t)$ на полуинтервале $(t_{23}, T_2]$ положительный в силу $t_3 = T_2$, то функция $\Delta V(t)$ принимает на сегменте (t_{23}, T_2) отрицательные значения. При $t = T_2$ выполняется равенство

$$\Delta V(T_2) = 0. \quad (19)$$

Рассмотрим полуинтервал $(T_2, t_{locm}^{(1)}]$. Функция $\Delta V(t)$ на этом полуинтервале имеет вид (11),

$$\Delta V(t) = \frac{2j_2 - j_1}{2}t + \left\{ \Delta V^0 + \frac{1}{2}[j_1t_{13n} - j_2(T_2 + t_{23})] \right\},$$

а момент времени t_4 подозрительный на безопасный момент касания определяется равенством (12).

$$t_4 = -\frac{2}{2j_2 - j_1} \left\{ \Delta V^0 + \frac{1}{2}[j_1t_{13n} - j_2(T_2 + t_{23})] \right\}.$$

Из равенства (18) следует, что разность

$$t_4 - T_2 = -\frac{1}{2j_2 - j_1} \left\{ 2\Delta V^0 + j_1(t_{13n} - T_2) - j_2(t_{23} - T_2) \right\} = 0,$$

следовательно

$$t_4 = T_2. \quad (20)$$

Так как коэффициент при t в выражении функции $\Delta V(t)$ на полуинтервале $(T_2, t_{1ocm}^{(1)})$ положительный в силу $t_4 = T_2$, то функция $\Delta V(t)$ принимает на этом полуинтервале положительные значения. При $t = T_2$ выполняется неравенство (15).

$$\Delta V(t_{1ocm}^{(1)}) > 0.$$

Таким образом, получили, что при переходе через точку $t_4 = T_2$ функция $\Delta V(t)$ меняет знак с «-» на «+», следовательно, момент времени $t_4 = T_2$ является безопасным моментом касания на полуинтервале $(t_{2з}, t_{1ocm}^{(1)})$.

С 1.2.1) Пусть в неравенствах (6) выполняется строгое неравенство (16).

$$t_{1ocm}^{(1)} < t_{2ocm}^{(2)}.$$

Очевидно, что функция $\Delta V(t)$ на полуинтервале $(t_{1ocm}^{(1)}, t_{2ocm}^{(2)})$ принимает отрицательные значения. Но тогда $\lim_{t \rightarrow t_{1ocm}^{(1)} + 0} \Delta V(t) = \Delta V(t_{1ocm}^{(1)}) < 0$, что противоречит неравенству (15). Полученное противоречие показывает, что при выполнении неравенств (6), (16) равенство (18) выполняться не может.

С 1.1.2) Пусть в условиях (6) выполняется равенство (17).

$$t_{1ocm}^{(1)} = t_{2ocm}^{(2)}.$$

Но тогда будет выполняться равенство $\Delta V(t_{1ocm}^{(1)} = t_{2ocm}^{(2)}) = 0$, которое противоречит неравенству (15). Полученное противоречие показывает, что при выполнении неравенства (6) и равенства (17) равенство (18) выполняться не может.

С 1.3) Пусть выполняется неравенство

$$2\Delta V^0 + j_1(t_{13n} - T_2) - j_2(t_{2з} - T_2) < 0. \quad (21)$$

Тогда разность (7) больше нуля, следовательно, выполняется неравенство

$$t_3 > T_2. \quad (22)$$

Так как коэффициент при t в выражении функции $\Delta V(t)$ на полуинтервале $(t_{23}, T_2]$ положительный и выполняется неравенство (22), то функция $\Delta V(t)$ принимает на этом полуинтервале отрицательные значения.

При $t = T_2$ выполняются неравенства

$$\begin{cases} \Delta V(T_2) < 0, \\ s(T_2) < 0. \end{cases}$$

Функция $\Delta V(t)$ на полуинтервале $(T_2, t_{1ocm}^{(1)})$ имеет вид (11), а момент времени t_4 подозрительный на безопасный момент касания определяется равенством (12).

С 1.3.1) Пусть в неравенствах (6) выполняется строгое неравенство (16).

$$t_{1ocm}^{(1)} < t_{2ocm}^{(2)}.$$

Неравенство (16) может быть записано в виде

$$2(j_2 V_1^0 - j_1 V_2^0) + j_1 j_2 [(t_{13n} - t_{23}) + (t_{13n} - T_2)] + 2j_2 V_1^0 < 0. \quad (23)$$

Рассмотрим разность

$$t_4 - t_{1ocm}^{(1)} = -\frac{1}{j_1(2j_2 - j_1)} \left\{ 2(j_2 V_1^0 - j_1 V_2^0) + j_1 j_2 [(t_{13n} - t_{23}) + (t_{13n} - T_2)] + 2j_2 V_1^0 \right\}. \quad (24)$$

Разность (24) положительна в силу неравенств (13) и (23). Отсюда следует, что выполняется неравенство

$$t_4 > t_{1ocm}^{(1)} \quad (25)$$

Очевидно, что функция $\Delta V(t)$ на полуинтервале $(t_{1ocm}^{(1)}, t_{2ocm}^{(2)})$ принимает отрицательные значения. Получили, что при выполнении неравенств (6),

(16), (21) функция $s(t)$ достигает отрицательного наименьшего значения при $t = t_5 = t_{2ocm}^{(2)}$.

С 1.1.2 Пусть в условиях (6) выполняется равенство (17).

$$t_{1ocm}^{(1)} = t_{2ocm}^{(2)}.$$

Тогда разность (23) равна нулю, следовательно, выполняются равенства

$$t_4 = t_{1ocm}^{(1)} = t_{2ocm}^{(2)}.$$

Тогда получаем, что при выполнении неравенств (6), (21) и равенства (17) функция $s(t)$ достигает отрицательного наименьшего значения при $t = t_5 = t_{2ocm}^{(2)}$.

Минимально-безопасное расстояние в этом случае определяется равенством

$$S_{\min}^0 = \frac{1}{2}[(T_2 + t_{2з})V_2^0 - 2t_{1зн}V_1^0] + \frac{j_1(V_2^0)^2 - 2j_2(V_1^0)^2}{2j_1j_2} - \frac{j_2}{8}(T_2 - t_{2з})^2. \quad (26)$$

Для обеспечения безопасности движения и предотвращения снижения пропускной способности дороги из-за возникновения дорожно-транспортного происшествия транспортные средства, движущиеся по прямолинейному участку дороги большой протяженности должны соблюдать расстояние, определенное по формулам 26.

Например, расстояние между автомобилями, исключающее возможность возникновения дорожно-транспортного происшествия, движущимися со скоростями $V_1 = 15$ м/с и $V_2 = 20$ м/с, определенное по формуле 26 составляет 28,98 м.

Литература

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

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

3. Суворов Ю.Б. Судебная дорожно-транспортная экспертиза. М.: Экзамен, 2003. 208 с.

4. Филатова Н.А., Габдорахманов А.С., Карев Б.Н. Нахождение минимально-безопасного расстояния между автомобилями, движущимися в попутном направлении, в одном частном случае // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: матер. XII всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016, ч.1. 365 с.

5. Бояркина Е.Ф., Логачев В.Г. Имитационное моделирование процесса формирования количества легковых автомобилей на улично-дорожной сети города // Инженерный вестник Дона, 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3254.

6. Быков Д.В., Лихачёв Д.В. Имитационное моделирование как средство модернизации участка транспортной сети // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2388.

7. Феофилова А.А. Обоснование выбора состояний транспортных потоков для начала их динамического перераспределения // Инженерный вестник Дона, 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1953.

8. Гасилова О.С., Алексеева О.В., Грехов О.Ю. Влияние интенсивности движения маршрутных транспортных средств на пропускную способность улично-дорожной сети // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3808.

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

10. Zyryanov V., Sanamov R. Improving urban public transport operation: experience of Rostov-on-Don (Russia) // International Journal of Transport Economics. 2009. V.36. №1. pp.83-96.

References

1. Ilarionov V.A. Jekspertiza dorozhno-transportnyh proisshestvij [Examination of road accidents]. M.: Transport, 1989. 255 p.

2. Karev B.N., Sidorov B.A., Nedorostov P.M. Metody rascheta bezopasnyh rasstojanij pri poputnom dvizhenii transportnyh sredstv [Methods of calculation of safe distances at the passing movement of vehicles]: monografija. Ekaterinburg: Ural. gos. lesotehn. un-t., 2005. 315 p.

3. Suvorov Ju.B. Sudebnaja dorozhno-transportnaja jekspertiza [Judicial road and transport examination]. M.: Jekzamen, 2003. 208 p.

4. Filatova N.A., Gabdoramhanov A.S., Karev B.N. Nauchnoe tvorcestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii: mater. XII vseros. nauch.-tehn. konf. Ekaterinburg: Ural. gos. lesotehn. un-t, 2016, ch.1. 365 p.

5. Bojarkina E.F., Logachev V.G. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3254.

6. Bykov D.V., Lihachjov D.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2388.

7. Feofilova A.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1953.

8. Gasilova O.S., Alekseeva O.V., Grehov O.Ju. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3808.

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

10. Zyryanov V., Sanamov R. International Journal of Transport Economics. 2009. V.36. №1. pp.83-96.